

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА В БУДІВНИЦТВІ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів які навчаються за напрямом підготовки 6.050502
"Інженерна механіка"

Київ 2010

УДК 621-83
ББК 31.261.5
Е50

Укладачі: Р.П. Бондар, кандидат технічних наук, доцент
І.В. Дубовик, інженер

Рецензент Г.М. Голенков, кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний за випуск Л.І. Мазуренко, доктор
технічних наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри електротехніки та
електроприводу, протокол № 11 від 8 лютого 2010 р.*

Видається в авторській редакції.

Електротехніка в будівництві: методичні вказівки до виконання
Е50 лабораторних робіт / уклад.: Р.П. Бондар, І.В. Дубовик. –
К.: КНУБА, 2010. – 56 с.

Містять лабораторні роботи за темами "Електричні кола"
та "Електричні машини і апарати" згідно робочої навчальної
програми. Також вказівки містять загальні вимоги до виконання
лабораторних робіт, правила техніки безпеки під час виконання
лабораторних робіт та додатки з умовними графічними
позначеннями елементів і пристроїв на електричних схемах.

Призначено для студентів які навчаються за напрямом
підготовки 6.050502 "Інженерна механіка".

© КНУБА, 2010

ЗМІСТ

Загальні положення.....	4
Обробка результатів експериментів та оформлення протоколу з лабораторної роботи.....	5
Техніка безпеки під час виконання лабораторних робіт.....	6
Лабораторна робота № 1. Дослідження явища резонансу струмів в електричних колах змінного струму.....	8
Лабораторна робота № 2. Дослідження трифазного кола змінного струму при з'єднанні приймачів зіркою.....	16
Лабораторна робота № 3. Дослідження однофазного трансформатора.....	24
Лабораторна робота № 4. Дослідження трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором.....	32
Лабораторна робота № 5. Дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням.....	40
Список літератури	50
Додаток 1. Зразок титульної сторінки протоколу лабораторної роботи	51
Додаток 2. Умовні графічні позначення елементів на електричних схемах.....	52
Додаток 3. Утворення кратних одиниць.....	54

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

На сучасному етапі розвитку будівельної галузі широко застосовуються різноманітні електротехнічні пристрої. До електричних машин і апаратів, що традиційно використовувались на будівельних майданчиках при будівництві інженерних мереж (електродвигуни, електровібратори, силові трансформатори та ін.), долучились нові типи частотно керованого електроприводу, виконавчі механізми на основі лінійних двигунів тощо. Саме тому важливе значення для підготовки спеціалістів у галузі теплогазопостачання і вентиляції має набуття ними електротехнічних знань та навичок.

Метою виконання лабораторних робіт з дисципліни "Електротехніка в будівництві" є практична підготовка студентів у процесі роботи з електричним устаткуванням, а також закріплення знань, здобутих ними при вивченні теоретичного курсу.

До виконання даних лабораторних робіт допускаються студенти, які успішно оволоділи матеріалом теоретичного курсу за відповідною тематикою, пройшли інструктаж з техніки безпеки та підготували протоколи, що містять усі необхідні для виконання роботи відомості.

Академічна група ділиться на окремі бригади від трьох до п'яти чоловік у кожній.

Одержавши дозвіл керівника занять, бригада студентів починає виконувати лабораторні роботи. Спочатку необхідно ознайомитись та записати до робочого зошита дані об'єкта, що досліджується. Під час вибору вимірювальних приладів необхідно користуватися не лише відповідністю межі виміру приладу максимальному значенню вимірюваної величини, але й брати до уваги відповідність системи приладу до роду вимірюваних струмів та напруг.

Якщо електрична схема містить велику кількість вимірювальних приладів та регулювальних реостатів, одночасно зі складанням схеми слід провести їхнє маркування (на паперових або картонних бирках помітити елементи схеми та прикріпити до них).

При складанні схеми, за можливістю, слід уникати перехрещення дротів і на один затиск приєднувати не більш як три дроти. Усі з'єднання дротів повинні бути надійними. Зібрану схему перевіряє керівник. Вмикання лабораторної установки можна проводити лише з його дозволу. При цьому необхідно звернути увагу на покази приладів.

У колах постійного струму при використанні вимірювальних приладів магнітоелектричної системи можливе відхилення стрілки ліворуч від нуля. У цьому випадку, вимкнувши установку, слід поміняти місцями проводи, що підходять до приладу.

Відлік показів з усіх вимірювальних приладів слід вести, за можливістю, одночасно. Не можна робити перерву в початковій серії спостережень. Якщо з'явилися сумніви щодо вірності показів якого-небудь приладу, необхідно повторити виміри усіма приладами.

По закінченні роботи студент повинен надати керівнику оформлений належним чином протокол для підпису та отримання оцінки.

Обробка результатів експериментів та оформлення протоколу з лабораторної роботи

Протокол повинен містити назву лабораторної роботи та її мету, схему лабораторної установки, таблиці для записів експериментальних та розрахункових даних і має бути пред'явлений керівнику для перевірки до початку виконання лабораторної роботи. Перша сторінка протоколу – титульна, зразок якої наведено в дод. 1. В ході роботи студент доповнює протокол результатами вимірювань та розрахунків, опрацьовує результати дослідів, виконує побудову графіків, векторних діаграм й формулює висновки.

Усі схеми, таблиці та графіки, що наводяться у протоколі, повинні бути виконані з дотриманням існуючих стандартів. Елементи електричних схем виконуються за допомогою інструментів або спеціального трафарету, а їхні умовні позначення повинні відповідати державним стандартам (див. дод. 2).

Графіки та векторні діаграми будують в масштабі за допомогою креслярських інструментів. Координатні осі зображують суцільними лініями зі стрілками на кінцях, одиниці виміру шкал по осях вибирають рівномірними з використанням всієї площі графіку.

В спільних координатних осях можлива побудова одного або кількох графіків. За необхідності до основної вертикальної осі можуть додаватися допоміжні, кількість яких визначається масштабом та кількістю графіків, а також зручністю сприйняття. Для побудови криволінійного графіка необхідно мати не менше ніж п'ять точок.

У висновках необхідно дати аналіз отриманих результатів, показати відповідність експериментальних досліджень теоретичним положенням й вказати причини можливих похибок.

Техніка безпеки під час виконання лабораторних робіт

Під час виконання робіт в електротехнічних лабораторіях, студенти повинні виявляти виняткову обережність та чітко дотримуватися вимог правил техніки безпеки.

Необхідно беззаперечно виконувати всі вказівки керівника занять, бути дисциплінованим, уважним, знаходитись безпосередньо біля досліджуваної лабораторної установки.

Для підготовки робочого місця необхідно здійснити відповідні відключення і вжити заходів, що перешкоджають помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури.

Забороняється на лабораторних стендах або поблизу них проводити дії, які викликають сильний струс, що може спричинити до самочинного ввімкнення комутаційної апаратури.

Правильність збирання кола перевіряє керівник, і тільки з його дозволу можна вмикати напругу.

Перед подачею напруги на лабораторний стенд, студент повинен оголосити усно: "Подаю напругу" та пересвідчитись, що його почули.

Проведення досліджень та випробувань повинно проводитись чітко за планом та в послідовності, що вказані в даних методичних вказівках до лабораторних робіт.

Забороняється залишати робоче місце без дозволу керівника, при цьому кількість членів бригади, що залишаються на робочому місці має бути не менше двох; члени бригади, що повернулися можуть стати до роботи тільки з дозволу керівника.

Забороняється підходити до інших установок, розподільчих щитів та пультів і робити на них будь-які ввімкнення або перемикання, проводити приєднання у схемі, що знаходиться під напругою, торкатися до частин, що обертаються, або нахилятися до них близько під час роботи електричної машини, залишати без нагляду лабораторну установку або окремі прилади під напругою.

Одяг повинен бути застебнутим, не мати звислих кінців шарфів, хусток, ланцюжків, тощо, а зачіски або головний убір повинні виключати можливість попадання волосся на струмоведучі частини.

При роботі з лабораторною установкою, що знаходиться під напругою, студенти повинні стояти на ізоляційних гумових килимках.

Якщо схема містить конденсатори, то після знімання напруги, необхідно забезпечити зняття накопиченого заряду.

У разі виявлення пошкодження провідників, іскріння, витікання оливи, появи диму, специфічного запаху, підвищеного шуму, стукоту, вібрації, необхідно негайно вимкнути напругу і доповісти керівнику.

Інструктаж з техніки безпеки фіксується у спеціальному журналі, де кожний студент розписується про ознайомлення.

У випадку порушення правил техніки безпеки бригада виводиться з місця роботи. Член бригади, що допустив порушення відсторонюється від роботи до перевірки знань з правил техніки безпеки.

Лабораторна робота № 1
ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ СТРУМІВ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ



Мета роботи

- Провести експериментальні дослідження явища резонансу струмів.
- На підставі проведених досліджень встановити умови виникнення та наслідки резонансу.
- Закріпити навички побудови векторних діаграм для паралельного з'єднання елементів.



Основні теоретичні положення

Резонанс струму – це особливий режим роботи електричного кола, яке містить паралельно з'єднані індуктивний та ємнісний елементи. При резонансі кут зсуву фаз між загальними напругою та струмом φ – дорівнює нулю, а реактивні складові струмів віток протилежні за фазою і рівні.

Умовою виникнення резонансу струмів є рівність нулю вхідної реактивної провідності кола $B = B_L - B_C = 0$, тобто індуктивна провідність B_L має бути рівною ємнісній провідності B_C .

Електричне коло показане на рис. 1.1, а, називають *паралельним резонансним контуром*. Одна вітка кола містить котушку індуктивності, яка представлена схемою заміщення з послідовним з'єднанням резистора R_1 , що характеризує активний опір котушки та індуктивного елемента L з індуктивним опором X_L . Друга вітка має послідовно з'єднані ємнісний елемент C з ємнісним опором X_C та резистор R_2 з активним опором, що характеризує втрати в діелектрику конденсатора. Оскільки останні мають невелике значення, то при практичних розрахунках можуть не враховуватися.

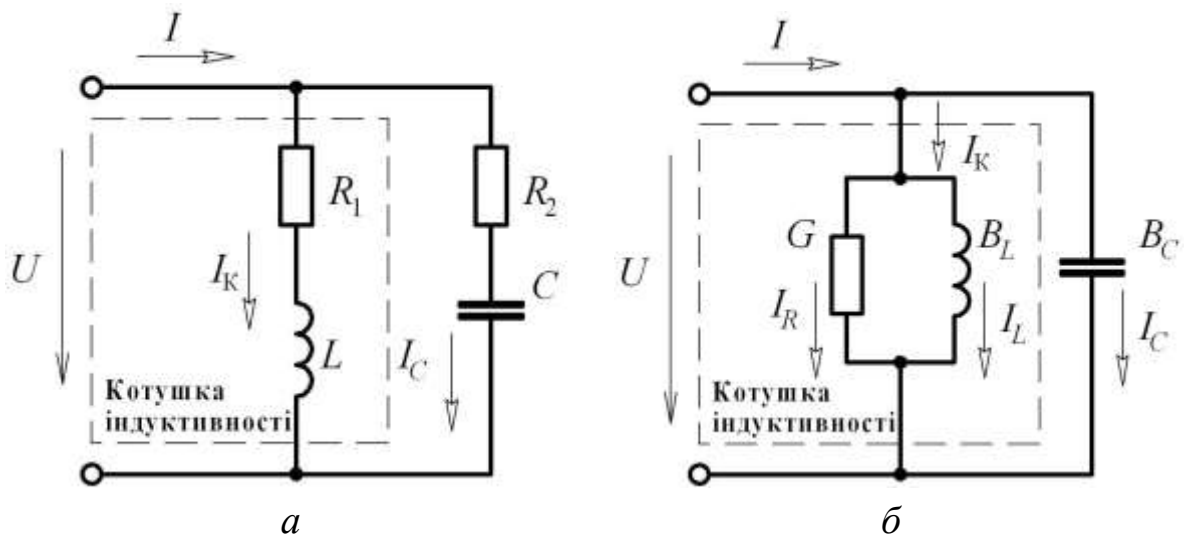


Рис. 1.1. Паралельний резонансний контур

Для спрощення аналізу і розрахунку, таке коло доцільно представити еквівалентним електричним колом з провідностями індуктивного, ємнісного та резистивного елементів, відповідно B_L , B_C , G (рис. 1.1, б). Тоді, на підставі відомих співвідношень

$$G = \frac{R}{Z^2} = \frac{R}{R^2 + X_L^2}, \quad (1.1)$$

$$B_L = \frac{X_L}{Z^2} = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad (1.2)$$

де Z – повний опір вітки, що містить котушку індуктивності, Ом; $X_L = \omega L$ – індуктивний опір, Ом; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота електричного струму, рад/с; f – частота струму, Гц; L – індуктивність котушки, Гн.

Якщо знехтувати втратами в діелектрику конденсатора, то провідність вітки, що містить ємнісний елемент можна визначити за формулою

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C, \quad (1.3)$$

де $X_C = 1/\omega C$ – ємнісний опір, Ом; C – ємність конденсатора, Ф.

Згідно закону Ома для ділянки з паралельним з'єднанням елементів R , L , C загальний струм дорівнює

$$I = UY = U\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}, \quad (1.4)$$

де $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$ – повна провідність кола, См.

Кут зсуву фаз між напругою та загальним струмом кола – φ , можна визначити з трикутника провідностей за формулою

$$\varphi = \arctg \frac{B}{G} = \arcsin \frac{B}{Y}, \quad (1.5)$$

де $B = B_L - B_C$ – реактивна провідність кола, См.

Існує два способи досягнення резонансу в такому електричному колі – частотний і параметричний. Оскільки реактивні провідності обох віток залежать від частоти (1.2), (1.3), причому зі зростанням частоти індуктивна провідність зменшується, а ємнісна збільшується, то змінюючи частоту джерела, можна досягти рівності реактивних провідностей обох віток і такий резонанс називається *частотним*. Інакше можна отримати резонанс підбираючи параметри L і C при заданій частоті, в такому випадку говорять про *параметричний* резонанс.

Кутова частота, при якій настає резонанс, називається *резонансною кутовою частотою*. Прирівнявши реактивні провідності обох віток $B_L = B_C$, або $\frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = \omega C$, отримаємо

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{L}}. \quad (1.6)$$

Векторна діаграма для паралельного з'єднання елементів R , L і C будується наступним чином. Спочатку необхідно обрати та вказати на діаграмі масштаб для напруги та струмів. Оскільки при паралельному з'єднанні спільним для всіх елементів є напруга, то зручно починати побудову з вектора напруги, умовно приймаючи її початкову фазу рівною нулю $\psi_u = 0$ (рис. 1.2). Довжина вектора дорівнює відношенню діючого значення напруги до обраного масштабу.

Вектор струму вітки, що містить ємнісний елемент \vec{I}_C , випереджає вектор напруги на кут $\pi/2$ (90°). Струм котушки індуктивності має дві складові – активну та реактивну. Вектор реактивного струму котушки \vec{I}_L відстає від вектора напруги на кут

$\pi/2$. Діюче значення цього струму дорівнює

$$I_L = UB_L. \quad (1.7)$$

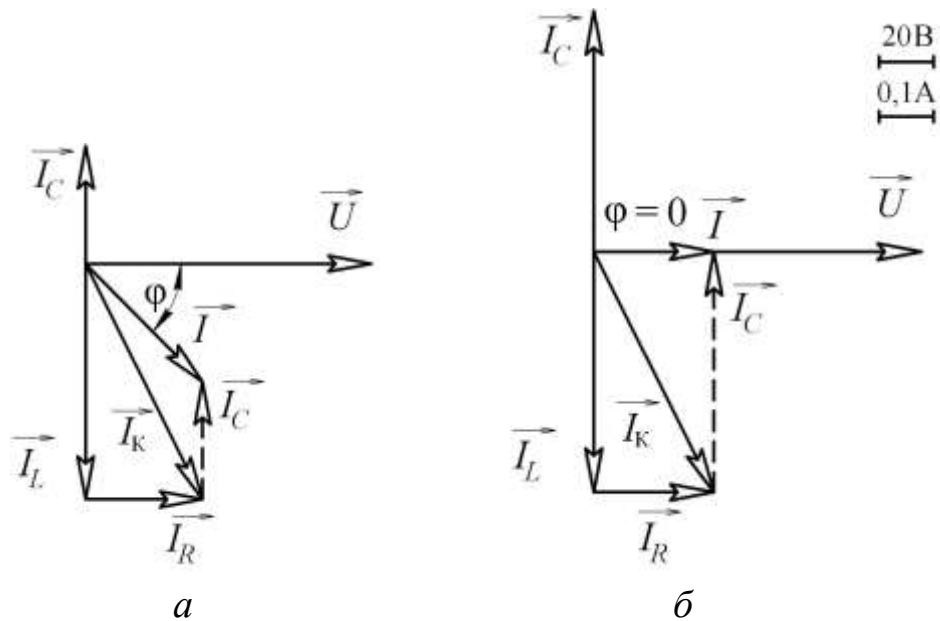


Рис. 1.2. Векторні діаграми для паралельного з'єднання елементів R, L, C

Вектор активної складової струму котушки \vec{I}_R співпадає за напрямком з вектором напруги і відкладається в масштабі діючого значення, що дорівнює

$$I_R = UG. \quad (1.8)$$

Сума цих двох векторів є вектор струму котушки індуктивності \vec{I}_K . Якщо до цього вектора додати вектор струму ємнісного елемента \vec{I}_C з модулем

$$I_C = UB_C, \quad (1.9)$$

то отримаємо вектор загального струму кола \vec{I} , та кут зсуву ϕ між цим вектором та вектором напруги \vec{U} . На рис. 1.2, *a* зображено випадок коли $I_L > I_C$, тобто $C < C_0$ (C_0 – значення ємності за якого в колі настає резонанс) і кут ϕ – додатний, а на рис. 1.2, *б* випадок, коли $I_L = I_C$, тобто $C = C_0$, а кут $\phi = 0$.

Як видно з наведених векторних діаграм, якщо при незмінних параметрах котушки індуктивності збільшити значення ємності, то значення ємнісної провідності та струм ємнісного елемента I_C також збільшаться, що в підсумку призведе до зменшення кута зсуву ϕ .

Режим роботи котушки індуктивності при цьому не змінюється, але загальний струм кола I зменшується.

Наслідки резонансу струмів:

1) оскільки реактивні провідності обох віток рівні між собою, то повна провідність кола дорівнює активній провідності

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G, \quad (1.10)$$

отже, загальний струм електричного кола буде мінімальний

$$I = UY = UG; \quad (1.11)$$

2) реактивні складові струмів обох віток будуть рівними

$$I_L = UB_L = I_C = UB_C; \quad (1.12)$$

3) реактивна енергія магнітного поля котушки індуктивності буде повністю переходити в енергію електричного поля конденсатора і навпаки, а коло буде споживати із мережі тільки активну потужність P , яка в цьому випадку буде дорівнювати повній потужності S , причому коефіцієнт потужності дорівнює

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = 1. \quad (1.13)$$

Явище резонансу струмів практично використовується для штучного підвищення коефіцієнта потужності в електричних мережах, електроустановках тощо. Енергія, що споживається приймачами і перетворюється в інші види енергії (механічну, теплову і т.д.), пропорційна активній потужності. Оскільки існуюче енергетичне обладнання має переважно активно-індуктивний характер навантаження, то, для підвищення коефіцієнта потужності паралельно до електричної установки підключають ємнісний елемент, зменшуючи таким чином загальний струм, а, отже, і втрати в з'єднувальних лініях, обмотках джерел електроенергії тощо.



Проведення дослідів

1. Скласти електричне коло за рис. 1.3.

Установка для проведення дослідів складається з лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа), до вторинної обмотки якого приєднуються паралельно з'єднані котушка індуктивності та батарея конденсаторів. Вольтметр V вимірює значення підведеної напруги U . Амперметр A_1 вимірює загальний струм кола I . Амперметри A_2 , A_3 – відповідно струм котушки індуктивності, I_K та струм конденсаторів I_C .

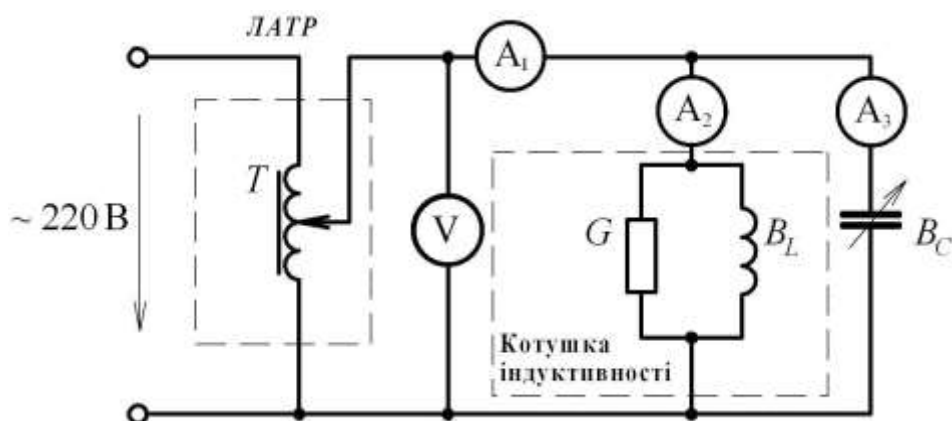


Рис. 1.3. Схема лабораторної установки

2. Встановити вимірювальні прилади на межі вимірювання, що відповідають максимальним значенням вимірюваної величини, а регулювальну ручку ЛАТРа встановити в положення, при якому його вихідна напруга дорівнює нулю (до упору проти годинникової стрілки).

3. За вказівкою керівника заняття подати на вхід схеми живлення і за допомогою ЛАТРа встановити напругу заданої величини.

4. Встановити значення ємності $C = 0$ та записати покази приладів до табл. 1.1. Збільшуючи значення ємності, проводять серію дослідів, намагаючись при цьому досягти резонансу струмів, який фіксується за найменшим значенням струму у нерозгалуженій ділянці кола (амперметр A_1). Підкреслити рядок в табл. 1.1 з даними, що відповідають резонансу струмів.

5. Після досягнення резонансу провести декілька дослідів при $C > C_0$. Величину $C_{\text{макс}}$ визначає керівник заняття.

Таблиця 1.1

№ п/п	Дані вимірювань					Результати обчислень						
	U , В	C , мкФ	I , А	I_K , А	I_C , А	B_C , См	B , См	P , Вт	S , ВА	$\cos \varphi$	φ , град	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
Відмітки викладача							Оцінка			Підпис		

6. Для визначення параметрів котушки індуктивності скласти електричне коло за рис. 1.4.

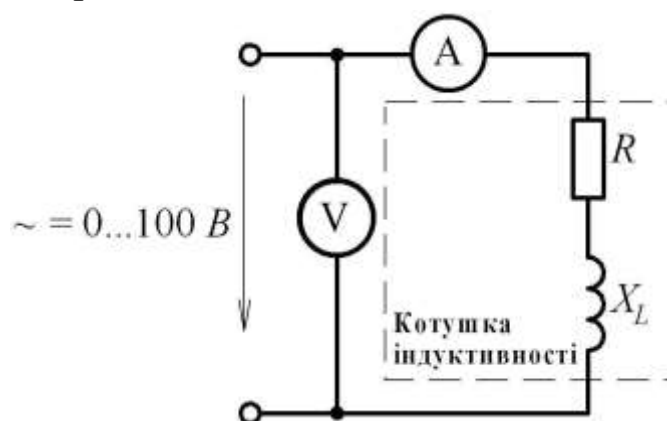


Рис. 1.4. Схема для визначення параметрів котушки індуктивності

7. За вказівкою викладача встановити на вході схеми задану величину напруги. Провести вимірювання спочатку при змінному струмі, а потім при постійному. Результати занести до табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Змінний струм		Постійний струм	
$\sim U$, В	$\sim I$, А	$= U$, В	$= I$, А



Опрацювання результатів дослідів

1. Визначити параметри котушки індуктивності R, L .



Активний R та повний опір Z_K котушки індуктивності можна визначити за даними табл.1.2 – при постійному струмі $R = \frac{U}{I}$, Ом; при змінному

струмі $Z_K = \frac{\sim U}{\sim I}$, Ом. Тоді індуктивний опір котушки визначиться за

формулою $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R^2} = \omega L$, Ом, а індуктивність $L = \frac{X_L}{\omega}$, Гн, де

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота, рад/с; $f = 50$ Гц – частота струму в мережі.

2. Розрахувати активну провідність G за формулою (1.1), індуктивну провідність B_L за формулою (1.2).

3. Розрахувати ємнісну провідність B_C за формулою (1.3), та реактивну провідність $B = B_L - B_C$ для кожного значення C (значення ємності з табл. 1.1 брати у фарадах!), приймаючи частоту струму в мережі $f = 50$ Гц, результати занести у відповідні колонки табл. 1.1.

4. Розрахувати активну потужність P , повну потужність S , коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ та кут зсуву фаз між напругою та струмом φ . Результати занести у відповідні колонки таблиці 1.1.



Оскільки активна потужність P даного кола дорівнює потужності, що розсіюється на активному опорі котушки індуктивності, значення потужності залишається незмінним при проведенні дослідів і має бути визначене за формулою $P = I_K^2 R$, Вт. Повна потужність визначається за формулою $S = UI$, ВА. Тоді коефіцієнт потужності можна визначити за формулою $\cos \varphi = \frac{P}{S}$, звідки $\varphi = \arccos(\cos \varphi)$.

5. Розрахувати величину ємності, при якій виникає резонанс струмів.



Прирівнявши реактивні провідності обох віток $B_L = B_C$, або $\frac{X_L}{Z_K^2} = \omega C$, при заданій кутовій частоті ω , можна визначити C_0 – значення ємності при якому виникає резонанс струмів.

6. Побудувати графіки залежностей $I = f(C)$, $\cos \varphi = f(C)$.



По горизонтальній осі (абсцис) відкладається значення ємності C по вертикальній осі (ординат) відкладаються значення загального струму I та

$\cos\varphi$ з відповідних колонок табл. 1.1.

7. За даними вимірювань побудувати в масштабі векторну діаграму напруги та струмів для випадків $C < C_0$, $C = C_0$, $C > C_0$.



Контрольні запитання

1. Записати закон Ома для визначення загального струму та струмів у вітках досліджуваного електричного кола.
2. Навести умови за яких виникає резонанс струмів.
3. Як визначається значення резонансної частоти?
4. Як впливає зміна частоти прикладеної напруги на величину реактивної провідності кола та реактивних провідностей віток?
5. Навести наслідки резонансу струмів.
6. Від чого залежить кут зсуву фаз між напругою та струмом?
7. Як на практиці використовується явище резонансу струмів?
8. Пояснити побудову векторної діаграми.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЗІРКОЮ



Мета роботи

- Провести експериментальні дослідження трифазного кола при з'єднанні приймачів зіркою в різних режимах роботи й різному навантаженні.
- На підставі проведених досліджень перевірити основні розрахункові співвідношення для даного з'єднання.
- Закріпити навички побудови векторних діаграм при з'єднанні приймачів зіркою.



Основні теоретичні положення

Трифазним називається електричне коло, в якому діють три синусоїдні ЕРС однакової частоти, що генеруються одним джерелом і зсунені одна відносно одної за фазою на $1/3$ періоду.

Під *фазою* розуміють аргумент синусоїдного струму, який відраховується від точки переходу через нуль до додатного значення. Значення фази у момент часу $t = 0$, прийнято називати *початковою фазою*. Також фазою називають частину електричного кола, в якій може протікати один із струмів трифазної системи струмів. В такому випадку говорять про фазу джерела, фазу приймача, обмотки електричної машини, тощо.

Для зменшення кількості провідникових матеріалів та витрат на спорудження ліній електропередач окремі фази трифазного електричного кола з'єднуються між собою зіркою, або трикутником.

З'єднанням *зіркою* називається таке з'єднання, при якому кінці x, y, z трьох фаз з'єднуються між собою в одну точку, яка називається *нейтральною* або *нульовою* а початки фаз a, b і c за допомогою трьох *лінійних проводів* підключаються до іншої частини кола (рис. 2.1).

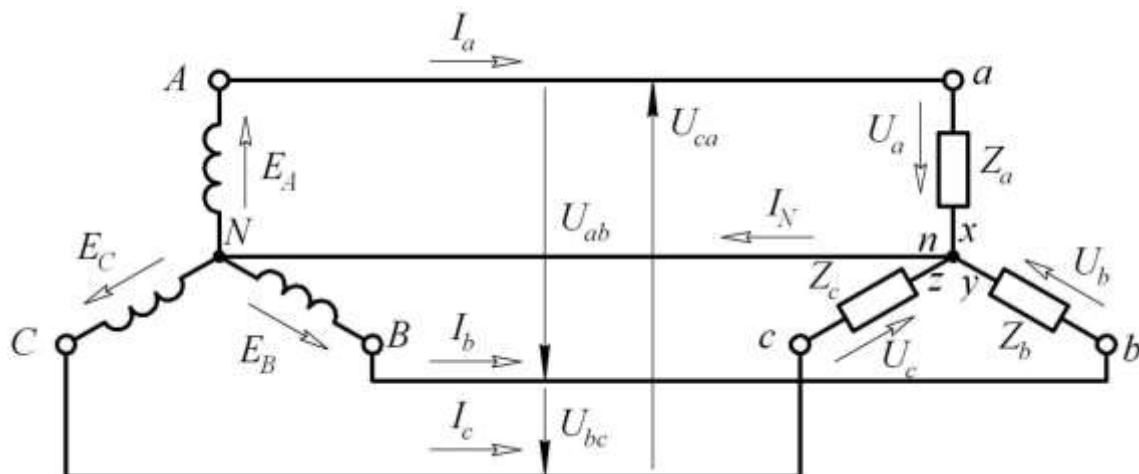


Рис. 2.1. Схема з'єднання джерела та приймача зіркою

Нейтральні точки генератора N та приймача n можуть з'єднуватися між собою *нейтральним проводом*.

В трифазних електричних колах розрізняють фазні і лінійні напруги та струми. Напруги між початками та кінцями окремих фаз називають *фазними* напругами. *Лінійними* називають напруги між початками фаз джерела чи приймача або між лінійними проводами. На рис. 2.1 фазні напруги – U_a, U_b, U_c , лінійні напруги – U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} . Застосовуючи другий закон Кірхгофа, для контурів $nabn, nbcp$ і $pcan$

отримаємо наступні рівняння, що пов'язують лінійні та фазні напруги:

$$\vec{U}_{ab} = \vec{U}_a - \vec{U}_b; \vec{U}_{bc} = \vec{U}_b - \vec{U}_c; \vec{U}_{ca} = \vec{U}_c - \vec{U}_a. \quad (2.1)$$

При *симетричній* системі напруг їхні діючі значення рівні між собою, а фази відрізняються на одну третю періоду, тобто на кут $2\pi/3$ (120°), причому між лінійними $U_{\text{л}}$ та фазними $U_{\text{ф}}$ напругами має місце співвідношення

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (2.2)$$

Для фазних напруг при розрахунках та побудові векторних діаграм зазвичай приймають такі початкові фази: для фази A – $\psi_{U_a} = 0$; для фази B – $\psi_{U_b} = -2\pi/3$ (-120°); фази C – $\psi_{U_c} = -4\pi/3$ (-240°).

Струми, що протікають у фазах джерела або приймача, називають *фазними струмами*. Струми, які протікають в лінійних проводах називаються *лінійними струмами*. Як видно з рис. 2.1, при з'єднанні зіркою фазні струми дорівнюють лінійним струмам

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}. \quad (2.3)$$

Струм нейтрального проводу можна визначити за першим законом Кірхгофа для вузлової точки n (рис. 2.1)

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c. \quad (2.4)$$

Якщо рівні між собою окремо активні та реактивні опори усіх фаз (тобто рівні комплексні опори) приймача, то в такому випадку говорять про *симетричне навантаження*.

При симетричному навантаженні

$$I_a = I_b = I_c = I_{\text{ф}}; \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_{\text{ф}}; P_a = P_b = P_c = P_{\text{ф}}; \\ Q_a = Q_b = Q_c = Q_{\text{ф}}; S_a = S_b = S_c = S_{\text{ф}}, \quad (2.5)$$

а струм у нейтральному проводі дорівнює нулю.

Векторна діаграма напруг та струмів приймача, при з'єднанні зіркою, будується наступним чином. Спочатку необхідно обрати та вказати на діаграмі масштаб для напруг та струмів. Вектор напруги фази A прийнято спрямовувати вертикально вгору, що відповідає повороту комплексної площини на 90° проти годинникової стрілки

(рис. 2.2, а). Довжина вектора дорівнює відношенню діючого значення напруги до обраного масштабу. Вектор напруги фази B відстає від вектору напруги фази A на кут 120° , а вектор напруги фази C відстає від вектору напруги фази A на кут 240° . Вектори лінійних напруг прийнято зображати так, щоб вони з'єднували кінці векторів відповідних фазних напруг, як показано на діаграмі.

При активному навантаженні кут зсуву між фазними напругами та струмами $\varphi_\phi = 0$, тому вектори фазних струмів співпадатимуть за напрямками з векторами відповідних фазних напруг. З рисунка видно, що сума векторів фазних струмів дорівнює нулю

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 0.$$

Несиметричним навантаження вважається тоді, коли комплексний опір хоча б однієї фази не дорівнює комплексному опору інших фаз. Також несиметричним вважається режим повного відключення однієї або двох фаз приймача. Векторна діаграма для несиметричного режиму показана на рис. 2.2, б. Струм нейтрального проводу побудований за рівнянням (2.4).

Трифазне коло, з'єднане зіркою, при несиметричному навантаженні повинно обов'язково мати нейтральний провід. За його відсутності значення фазних напруг залежать від величини та характеру фазних опорів і можуть суттєво відрізнятися від номінальних (рис. 2.2, в), тобто матиме місце аварійний режим.

При побудові векторної діаграми напруг та струмів на основі експериментальних даних при несиметричному режимі і відсутності нейтрального проводу (рис. 2.2, в), побудову слід починати з векторів лінійних напруг приймаючи до уваги, що їх значення та напрями залишаються незмінними. Потім, за допомогою циркуля з точки a проводять дугу з радіусом, що дорівнює довжині вектора \vec{U}_a з урахуванням прийнятого масштабу.

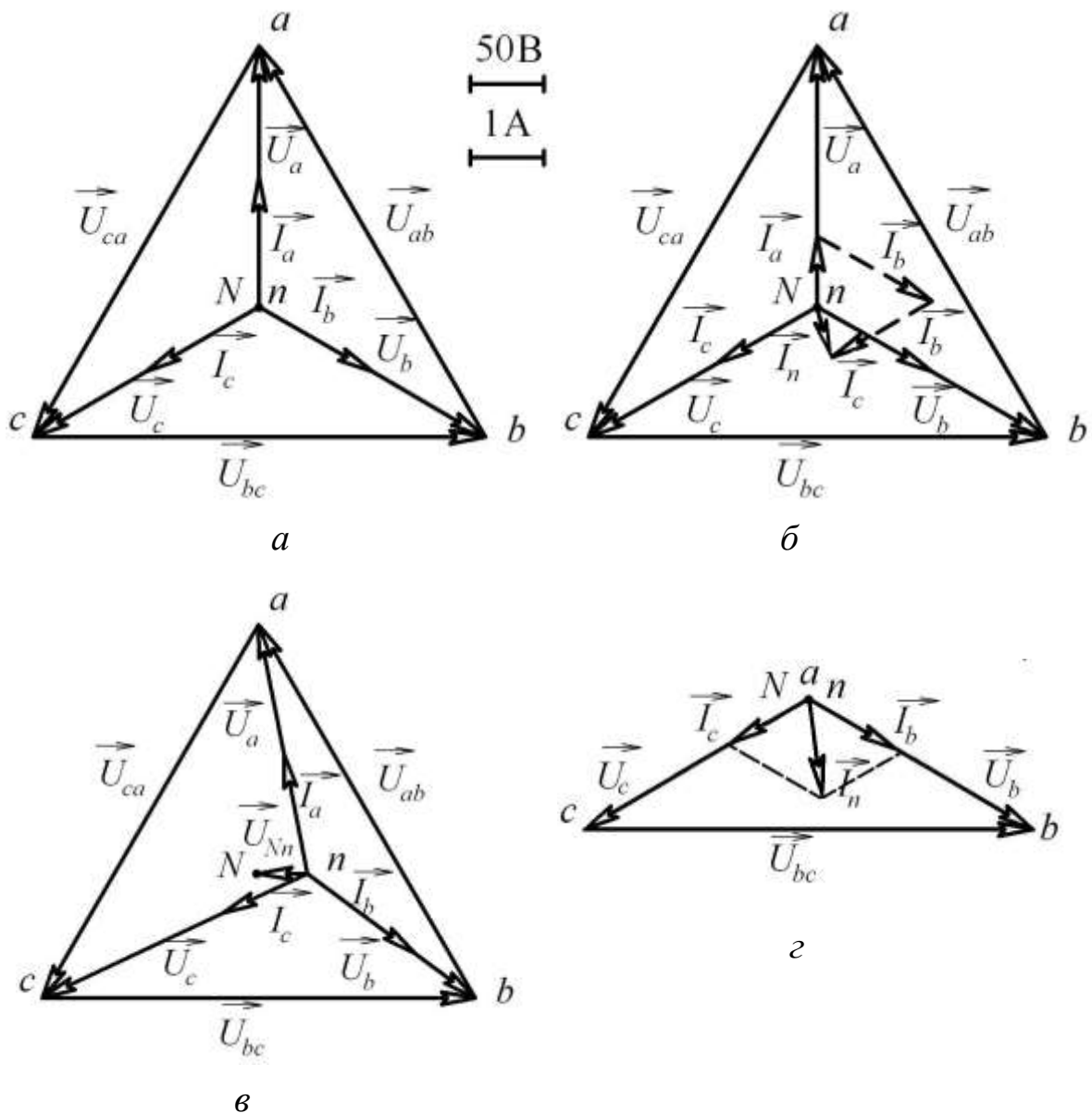


Рис. 2.2. Векторні діаграми напруг та струмів при з'єднанні приймача зіркою: *a* – симетричне навантаження; *б* – несиметричне навантаження з нейтральним проводом; *в* – несиметричне навантаження без нейтрального проводу; *г* – несиметричне навантаження при відключенні фази А з нейтральним проводом

Аналогічно з точки *b* проводять дугу з радіусом, що дорівнює довжині вектора \vec{U}_b (можна взяти інші два вектори фазних напруг, необов'язково \vec{U}_a й \vec{U}_b). З точки перетину двох дуг проводять три вектори фазних напруг. Вектори фазних струмів співпадатимуть за напрямками з векторами відповідних фазних напруг.

Режим несиметричного навантаження при відключенні фази A з нейтральним проводом ілюструє векторна діаграма, зображена на рис. 2.2, z . В цьому випадку потенціал точки a стає рівним потенціалу точки n .

При відсутності нейтрального проводу і відключенні, наприклад, фази A , приймачі фаз B та C виявляються з'єднаними послідовно і підключеними до лінійної напруги U_{bc} , а потенціали точок n і N стають різними. Коло в такому випадку перетворюється на однофазне.



Проведення дослідів

1. Скласти електричне коло за рис. 2.3.

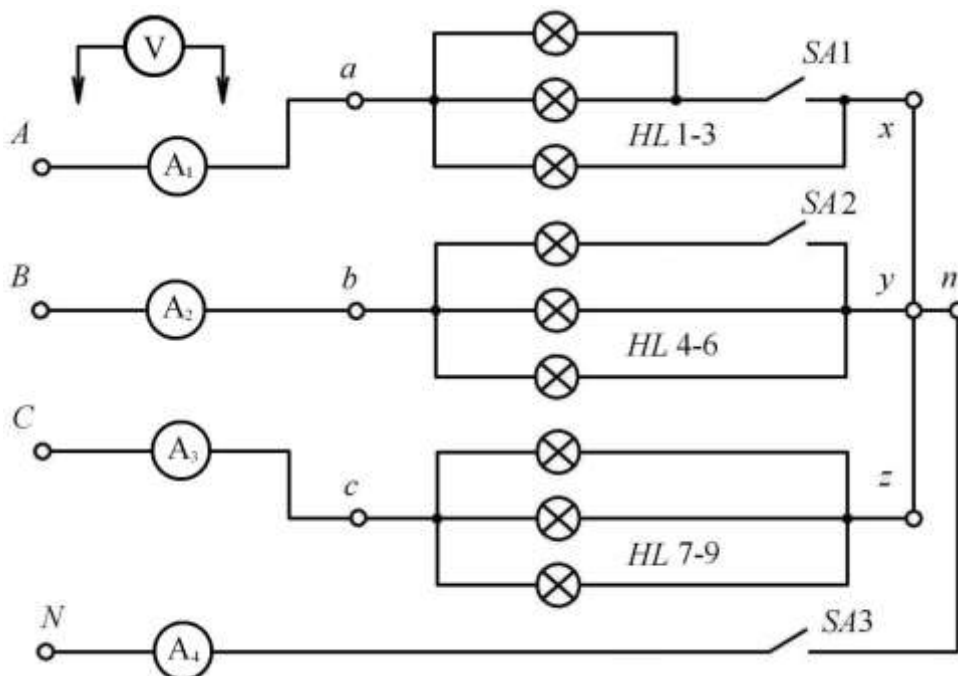


Рис. 2.3. Схема лабораторної установки

Установка для проведення дослідів являє собою трифазний приймач, в якості навантаження якого використані лампи розжарювання $HL1-9$. Зміна навантаження здійснюється за допомогою вимикачів $SA1$, $SA2$. Режим роботи нейтрального проводу встановлюється вимикачем $SA3$. Вольтметр V із щупами призначений для вимірювання фазних та лінійних напруг, а також напруги між нейтральними точками приймача та джерела. Амперметри A_1 , A_2 , A_3 вимірюють фазні струми, A_4 – струм в нейтральному проводі.

2. Встановити вимірювальні прилади на межі вимірювання, що відповідають максимальним значенням вимірюваної величини, а вимикачі SA1, SA2, SA3 в положення, що відповідає симетричному навантаженню (замкнути).

3. За вказівкою керівника занять подати на вхід схеми живлення.

4. Вольтметром зі щупами виміряти лінійні напруги U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , фазні напруги U_a , U_b , U_c , а також напругу між нейтральними точками приймача та джерела U_{Nn} , шляхом приєднання до відповідних затискачів лабораторної установки (фазні між початком та кінцем фази, лінійні між початками фаз). Записати покази приладів у відповідні колонки табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Режим	Дані вимірювань										Результати обчислень				
	Лінійні напруги, В			Фазні напруги, В			U_{Nn} , В	Фазні (лінійні) струми, А			I_n , А	Фазні потужності, Вт			ΣP , Вт
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_a	U_b	U_c		I_a	I_b	I_c		P_a	P_b	P_c	
1															
2															
3															
4															
5															
Відмітки викладача										Оцінка			Підпис		

Примітка. 1 – режим симетричного навантаження; 2 – режим несиметричного навантаження з нейтральним проводом; 3 – режим несиметричного навантаження без нейтрального проводу; 4 – режим несиметричного навантаження при відключенні однієї фази з нейтральним проводом; 5 – режим навантаження при відключенні однієї фази без нейтрального проводу.

5. Відключити нейтральний провід (розімкнути SA3) і переконатися, що при симетричному навантаженні режим роботи електричного кола не зміниться.

6. Встановити несиметричне навантаження (розімкнути SA1, SA2) й виконати ті ж самі виміри з нейтральним проводом і без нього.

7. Попередньо вимкнувши напругу, за вказівкою керівника, від'єднати один з лінійних проводів. Виконати вимірювання напруг та струмів у колі з нейтральним проводом і без нього.



Опрацювання результатів дослідів

1. Розрахувати співвідношення між лінійними та фазними напругами при симетричному навантаженні і порівняти їх з теоретичним значенням.

2. Обчислити активну потужність кожної фази і загальну потужність кола для всіх режимів роботи досліджуваного кола.

❗ Оскільки навантаження має активний характер, то кут зсуву фаз між фазними напругами та струмами $\varphi_\phi = 0$. Отже, активна потужність однієї фази дорівнює $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = U_\phi I_\phi$. Загальна потужність кола ΣP буде дорівнювати сумі фазних потужностей $\Sigma P = P_a + P_b + P_c$.

3. За даними вимірювань побудувати в масштабі векторні діаграми напруг та струмів.



Контрольні запитання

1. Яке з'єднання називається з'єднанням зіркою?
2. Які напруги називають фазними, а які лінійними. Як їх виміряти?
3. Чому дорівнює співвідношення між діючими значеннями фазних та лінійних напруг при з'єднанні зіркою.
4. Як виразити вектор лінійної напруги через вектори відповідних фазних напруг?
5. Як впливає на роботу електричного кола наявність чи відсутність нейтрального проводу?
6. Яке навантаження називається симетричним, а яке несиметричним?
7. Як визначити струм у нейтральному проводі?
8. Пояснити побудову векторних діаграм.

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА



Мета роботи

- Провести експериментальні дослідження однофазного трансформатора.
- На підставі проведених досліджень визначити втрати, коефіцієнт трансформації та побудувати робочі характеристики трансформатора.



Основні теоретичні положення

Трансформатор – це електромагнітний пристрій призначений для перетворення параметрів змінних напруг та струмів (амплітуд і фаз).

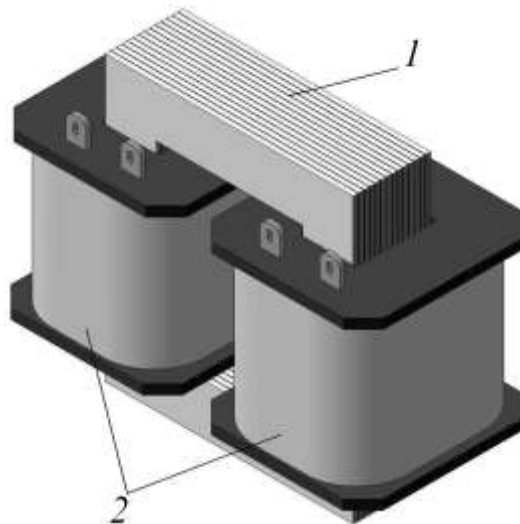


Рис. 3.1. Будова однофазного трансформатора: 1 – осердя;
2 – обмотки

Однофазний трансформатор, в найпростішому випадку, складається з *феромагнітного осердя 1*, на якому розміщені дві *обмотки 2* (рис. 3.1). Для зменшення втрат від вихрових струмів осердя складають із окремих пластин, ізольованих одна від одної шаром лаку, або за допомогою оксидування.

Обмотки трансформатора намотані ізольованим обмотковим (як правило мідним) проводом з низьким питомим опором. Обмотка на яку подається живлення від джерела або мережі називається *первинною*, а обмотка до якої підключається навантаження –

вторинною. Відношення кількості витків первинної обмотки до кількості витків вторинної має назву *коефіцієнт трансформації*

$$n = \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.1)$$

Обмотку з більшою кількістю витків називають *обмоткою вищої напруги* (ВН), а обмотку з меншою кількістю витків *обмоткою нижчої напруги* (НН). На електричних схемах затискачі обмотки ВН позначають *A, X*, а затискачі обмотки НН – *a, x*.

При подачі до первинної обмотки напруги U_1 , в ній починає протікати струм I_1 (рис. 3.2). Магніторушійна сила цієї обмотки утворює магнітний потік з амплітудою Φ_m , який замикається через феромагнітне осердя, пронизуючи витки вторинної обмотки. Оскільки струм змінний, то змінний і магнітний потік, а отже, згідно закону електромагнітної індукції у вторинній обмотці наводиться ЕРС взаємної індукції, що дорівнює швидкості зміни магнітного потокозчеплення Ψ_2

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t.$$

Діюче значення ЕРС вторинної обмотки визначають за формулою

$$E_2 = 4,44 \Phi_m f w_2, \quad (3.2)$$

де f – частота напруги живлення.

Якщо до вторинної обмотки підключити навантаження, то під дією ЕРС E_2 в ній почне протікати струм I_2 . При цьому збільшиться струм первинної обмотки I_1 . Таким чином, електрична енергія передається з первинної обмотки до вторинної, але з іншою напругою.

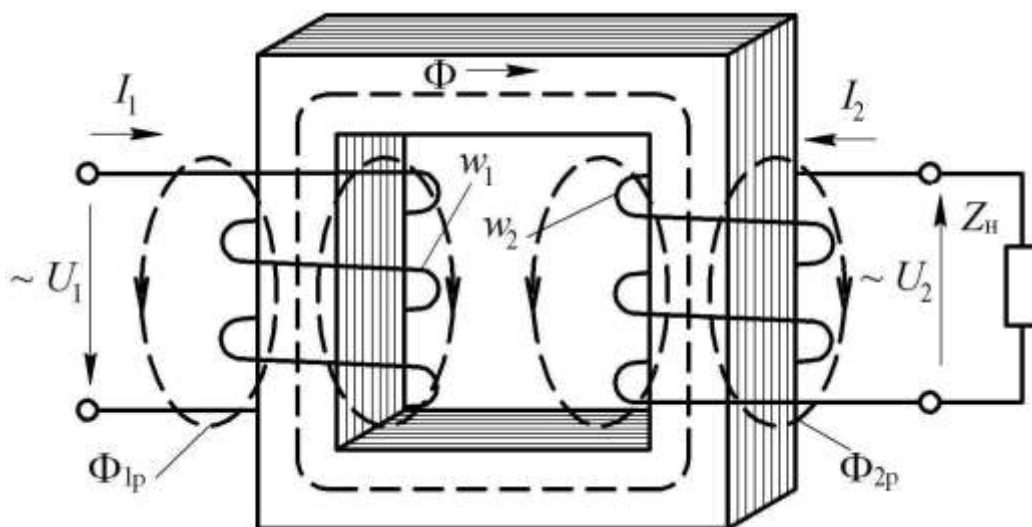


Рис. 3.2. Однофазний двообмотковий трансформатор

Крім магнітного потоку, що замикається через осердя і є спільним для обох обмоток, кожна з обмоток також створює власні потоки розсіювання, які індукують ЕРС розсіювання у первинній і вторинній обмотках, відповідно E_{1p} , E_{2p} .

На підставі другого закону Кірхгофа можна записати рівняння у векторній формі, що пов'язує ЕРС та напругу вторинної обмотки:

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 + \vec{E}_{2p} - \vec{I}_2 R_2,$$

де R_2 – активний опір вторинної обмотки.

Якщо кількість витків первинної обмотки більша ніж кількість витків вторинної $w_1 > w_2$, то напруга на навантаженні менша ніж напруга прикладена до первинної обмотки $U_2 < U_1$, і такий трансформатор називають *знижувальним*. При цьому струми підпорядковані зворотному співвідношенню $I_2 > I_1$.

Якщо кількість витків первинної обмотки менша ніж кількість витків вторинної $w_1 < w_2$, то напруга на навантаженні більша за прикладену напругу $U_2 > U_1$, і такий трансформатор називають *підвищувальним*, й $I_2 < I_1$.

Один і той самий трансформатор може бути як підвищувальним, так і знижувальним, залежно від того, до якої обмотки подається живлення.

Потужність, що споживається трансформатором із мережі –

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (3.3)$$

де φ_1 – кут зсуву фаз між напругою та струмом первинної обмотки.

Корисна потужність, що віддається до навантаження дорівнює

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_n, \quad (3.4)$$

де $\cos \varphi_n$ – коефіцієнт потужності навантаження, U_2 – напруга на навантаженні.

Корисна потужність P_2 менша за споживану потужність P_1 на величину втрат. Втрати у трансформаторі діляться на магнітні та електричні.

Потужність магнітних втрат складається з суми втрат на гістерезис та втрат на вихрові струми

$$P_m = P_\Gamma + P_{вхр}.$$

Втрати на гістерезис – це втрати, пов’язані з поглинанням енергії магнітного поля при перемагнічуванні феромагнітного осердя трансформатора.

Змінне магнітне поле спричиняє виникнення ЕРС не тільки в провідниках робочих обмоток, але й у магнітопроводі, який нерідко являє собою непоганий провідник. Під дією цієї ЕРС в осерді трансформатора починають протікати струми, що називаються *вихровими*, і виникають пов’язані з цим втрати.

Електричні втрати – це втрати в провідниках первинної та вторинної обмоток. Для однофазного двообмоткового трансформатора вони дорівнюють

$$P_e = P_{1e} + P_{2e} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2,$$

де I_1, I_2 – струм первинної та вторинної обмоток, відповідно; R_1, R_2 – активний опір відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора.

ККД трансформатора визначається за виразом

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.5)$$

При дослідженні трансформатора проводять три основних досліди: *дослід холостого ходу*, *короткого замикання* та досліджують трансформатор у *режимі навантаження*.

На підставі перших двох дослідів визначають такі параметри, як коефіцієнт трансформації, струм холостого ходу, втрати в магнітопроводі, втрати в провідниках обмоток, активний, реактивний та повний опори трансформатора та ін.

З врахуванням того, що в режимі холостого ходу $P_2 = 0$, а струм холостого ходу якісного трансформатора знаходиться в межах 3-8% від номінального, потужність електричних втрат є незначною. Тому потужність, споживана трансформатором в цьому режимі P_0 , наближено дорівнює потужності магнітних втрат, оскільки останні пропорційні квадрату підведеної напруги $P_m \sim U_1^2$ і будуть присутні повністю, тобто $P_0 \approx P_m$.

В режимі короткого замикання напруга первинної обмотки становить 3-10% від номінальної, тому магнітні втрати потужності є незначними. Оскільки у цьому режимі в обмотках протікають номінальні струми, споживана трансформатором потужність наближено дорівнює потужності електричних втрат в номінальному режимі $P_K \approx P_{e\text{ном}}$.

Дослідження трансформатора в режимі навантаження дозволяє отримати *робочі характеристики*, що представляють собою залежності напруги вторинної обмотки U_2 , коефіцієнта потужності $\cos\phi_1$, коефіцієнта корисної дії η , струму первинної обмотки I_1 від коефіцієнта навантаження

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}, \quad (3.6)$$

де $I_{2\text{ном}}$ – номінальний струм вторинної обмотки.

Для переважної більшості силових трансформаторів робочі характеристики мають типовий вигляд показаний на рис. 3.3.

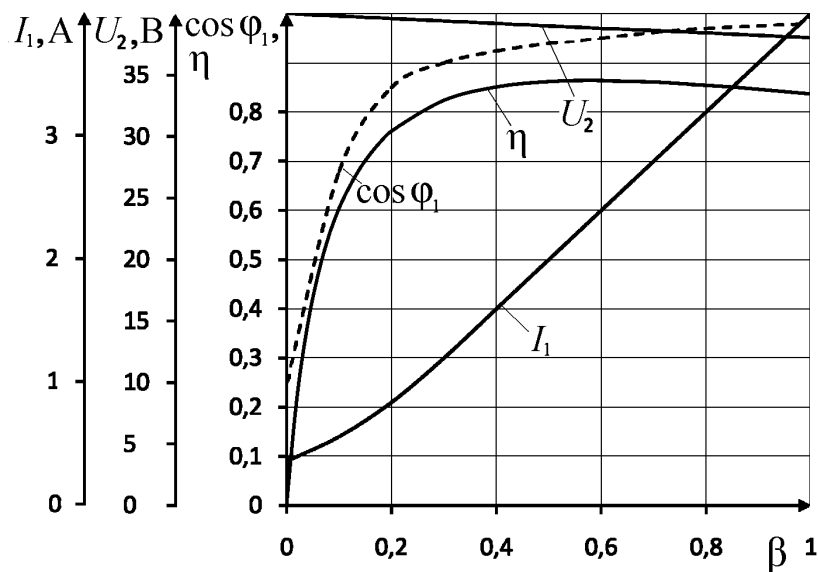


Рис. 3.3. Робочі характеристики трансформатора

При проведенні дослідів, номінальні струми первинної та вторинної обмоток можна визначати за формулами:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}; \quad I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}}, \quad (3.7)$$

де $S_{\text{ном}}$ – повна номінальна потужність.



Проведення дослідів

1. Для випробовування однофазного трансформатора скласти схему, показану на рис. 3.4.

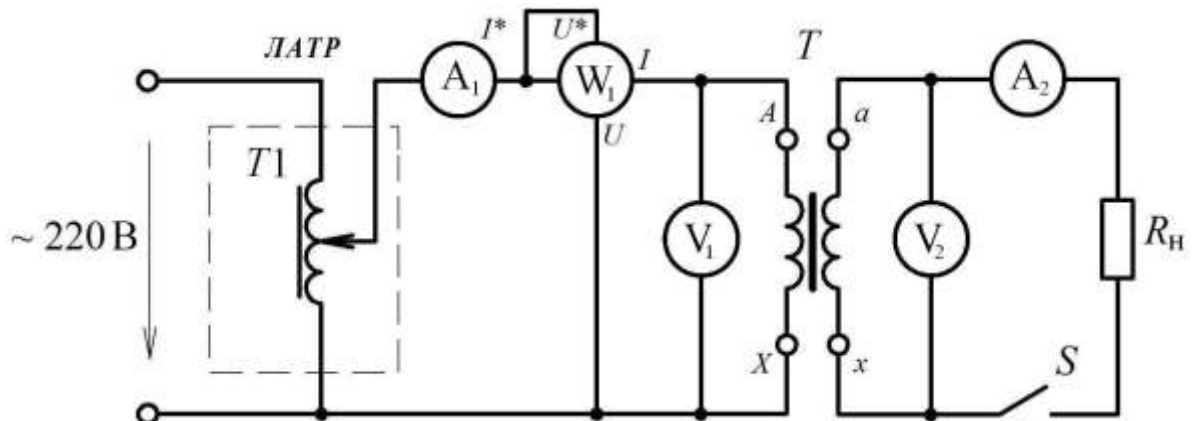


Рис. 3.4. Схема лабораторної установки

Установка має живлення від лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа), за допомогою якого встановлюється необхідна напруга.

У первинну обмотку дослідного трансформатора T увімкнено амперметр A_1 , вольтметр V_1 , ватметр W_1 для вимірювання відповідно напруги U_1 , струму I_1 та потужності P_1 первинної обмотки. До вторинної обмотки трансформатора приєднується реостат R_n , що являє собою активне навантаження, вимикач S та вольтметр V_2 і амперметр A_2 для вимірювання вторинної напруги U_2 й струму навантаження I_2 .

2. Встановити вимірювальні прилади на межі вимірювання, що відповідають максимальним значенням вимірюваної величини, а регулювальну ручку ЛАТРа встановити в положення, при якому його вихідна напруга дорівнює нулю (до упору проти годинникової стрілки).

3. Провести дослід холостого ходу трансформатора, для чого вторинну обмотку розімкнути за допомогою вимикача S , а в первинній обмотці за допомогою ЛАТРа встановити номінальну напругу $U_{10} = U_{1\text{ном}}$. Покази приладів занести до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Дані спостережень				Результати обчислень					
U_{10} , В	I_{10} , А	P_0 , Вт	U_{20} , В	K_U	$\frac{I_{10}}{I_{1\text{ном}}} 100\%$	$\cos\varphi_{10}$	Z_0 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом

4. Для виконання досліду короткого замикання трансформатора необхідно вилучити із схеми реостат R_n , а вільний затискач амперметра A_2 приєднати до вимикача S . Регулювальну ручку ЛАТРа встановити в положення, при якому його вихідна напруга дорівнює нулю (до упору проти годинникової стрілки). Вольтметр V_1 замінити іншим з меншою межею вимірювання. Поступово збільшуючи напругу за допомогою ЛАТРа, встановити номінальний струм в первинній обмотці ($I_{1ном}$ обчислюють за формулою (3.7)). Покази приладів записати в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Дані спостережень				Результати обчислень					
$U_{1к}$ В	$I_{1ном}$, А	P_k , Вт	$I_{2к}$, А	K_I	$\frac{U_{1к}}{U_{1ном}} 100\%$	$\cos\phi_{1к}$	Z_k , Ом	R_k , Ом	X_k , Ом

5. Для дослідження трансформатора в режимі навантаження, опір реостата R_n встановити на максимальне значення, замкнути вимикач S , а в первинній обмотці за допомогою ЛАТРа встановити номінальну напругу $U_1 = U_{1ном}$. Покази приладів записати до табл. 3.3. Зменшуючи опір реостата, записати дані ще п'яти дослідів. При цьому необхідно стежити за тим, щоб струм не перевищував номінального значення.

Таблиця 3.3

№ дослідів	Дані спостережень					Результати обчислень				
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	η	S_1 , ВА	$\cos\phi_1$	β
1										
2										
3										
4										
5										
6										
Відмітки викладача						Оцінка		Підпис		



Опрацювання результатів дослідів

1. За даними досліду холостого ходу розрахувати такі параметри

трансформатора:

- коефіцієнт трансформації напруг $K_U = \frac{U_{10}}{U_{20}}$;
- відсоткове значення струму холостого ходу відносно номінального значення $\frac{I_{10}}{I_{1\text{ном}}} 100\%$;
- коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу $\cos \varphi_{10} = \frac{P_0}{U_{10} I_{10}}$;
- повний, активний і реактивний опори трансформатора $Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}$,

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

2. За даними досліду короткого замикання розрахувати:

- коефіцієнт трансформації струмів $K_I = \frac{I_{2\text{к}}}{I_{1\text{ном}}}$;
- відсоткове значення напруги короткого замикання відносно номінального значення $\frac{U_{1\text{к}}}{U_{1\text{ном}}} 100\%$;
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{1\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{U_{1\text{к}} I_{1\text{ном}}}$;
- повний, активний і реактивний опори трансформатора $Z_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{I_{1\text{ном}}}$,

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{1\text{ном}}^2}, \quad X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}.$$

3. За результатами спостережень трансформатора в режимі навантаження розрахувати:

- активну потужність (3.4), що передається із вторинної обмотки до навантаження, причому $\cos \varphi_{\text{н}} = 1$, оскільки реостат $R_{\text{н}}$ являє собою активне навантаження;
- ККД трансформатора за (3.5);
- повну потужність $S_1 = U_1 I_1$;

- коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$;
- коефіцієнт навантаження за (3.6).

За даними спостережень і обчислень побудувати робочі характеристики трансформатора – залежності $U_2(\beta)$, $I_1(\beta)$, $\eta(\beta)$, $\cos \varphi_1(\beta)$.



Контрольні запитання

1. Призначення та будова трансформатора.
2. Принцип дії трансформатора.
3. Від чого залежать величина ЕРС та напруги вторинної обмотки?
4. Які втрати потужності мають місце у трансформаторі? Від чого вони залежать і як їх виміряти?
5. Що таке коефіцієнт навантаження трансформатора?
6. Як проводиться дослід холостого ходу, дослід короткого замикання, дослідження трансформатора в режимі навантаження? Які параметри і характеристики визначаються на підставі цих дослідів?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ



Мета роботи

- Провести експериментальні дослідження асинхронного двигуна з фазним ротором.
- На підставі проведених досліджень побудувати робочі та механічну характеристики асинхронного двигуна.



Основні теоретичні положення

Трифазний асинхронний двигун – це електрична машина, у якій збуджується обертове магнітне поле, але ротор обертається асинхронно, тобто з кутовою швидкістю, відмінною від кутової швидкості поля.

Основними частинами асинхронного двигуна (АД) є статор і ротор.

Статор являє собою полий циліндр, зібраний з листів електротехнічної сталі, які ізолювані один від одного шаром лаку (рис. 4.1, *а*). Три фазні обмотки, що утворюють обертове магнітне поле, розміщені в пазах статора. Кожна з фазних обмоток складається з котушок, намотаних ізолюваним мідним дротом, а кожна котушка ділиться на секції, що вкладаються у відповідні пази (розподілена обмотка).

Ротор АД складається із закріпленого на валу циліндричного осердя з пазами (рис. 4.1, *б*). До валу, який обертається на підшипниках відносно статора, приєднується навантаження.

Обмотка фазного ротора, як правило, виконується трифазною з тією ж кількістю котушок, що й обмотка статора. Три фазні обмотки ротора зазвичай з'єднуються зіркою, а вільні кінці приєднуються до трьох контактних кілець, що закріплені на валу та ізолювані від нього. По контактних кільцях ковзають щітки, забезпечуючи таким чином електричний контакт обмотки із зовнішнім колом. Якщо до обмотки ротора підключити трифазний реостат, то за допомогою нього можна плавно регулювати швидкість обертання. Крім того, застосування реостата дозволяє суттєво покращити пускові характеристики двигуна – зменшити пусковий струм і збільшити пусковий момент.

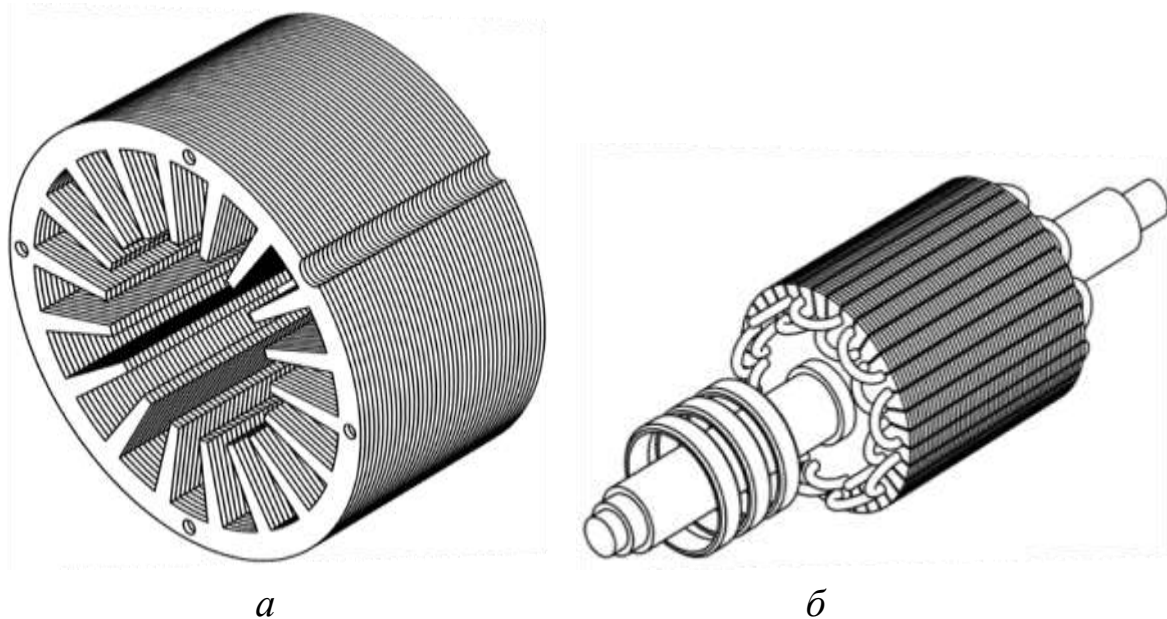


Рис. 4.1. Статор (*а*) і фазний ротор (*б*) асинхронного двигуна

При подачі на обмотки статора трифазної напруги, в них почнуть протікати струми, які створюють фазні магнітні поля. Завдяки тому, що осі фазних обмоток зсунуті одна відносно одної на 120° (електричних), а фази струмів обмоток відрізняються на одну третю періоду, результуюче магнітне поле, залишаючись незмінним за амплітудою, обертається з частотою (об/хв)

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (4.1)$$

де f_1 – частота напруг і струмів в обмотці статора; p – кількість пар полюсів обмотки.

При обертанні магнітного поля в обмотці кожної фази ротора, згідно закону електромагнітної індукції, наводиться ЕРС, діюче значення якої можна визначити за формулою

$$E_2 = 4,44f_2w_2\Phi_m k_{o62}, \quad (4.2)$$

де f_2 – частота ЕРС, що індукується у роторі (частота ковзання); w_2 – кількість витків фазної обмотки; Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку; k_{o62} – обмотковий коефіцієнт роторної обмотки.

Під дією індукованих ЕРС в фазних обмотках ротора починають протікати струми, взаємодія яких з обертовим магнітним полем статора, спричиняє виникнення обертового моменту, який приводить ротор у рух.

Відставання частоти обертання ротора n_2 від частоти обертання магнітного поля статора n_1 прийнято характеризувати *ковзанням*, що визначається відношенням

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (4.3)$$

тоді частоту ковзання можна визначити за формулою

$$f_2 = f_1 s.$$

З формули (4.2) видно, що чим швидше обертається ротор, тим менша індукується ЕРС, а отже і менші струми протікають в його фазних обмотках. Обертовий момент АД пропорційний добутку потоку обертового магнітного поля і струму в обмотці ротора,

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} m_2 p w_2 k_{o62} \Phi_m I_2 \cos \varphi_2, \quad (4.4)$$

де m_2 – число фаз ротора; I_2 – струм ротора; φ_2 – кут зсуву фаз між струмом та ЕРС ротора. З наближенням частоти обертання ротора до частоти обертання магнітного поля струм I_2 , а отже і момент двигуна M прямує до нуля.

При роботі АД споживає із мережі активну потужність

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

де U_1 – фазна напруга; I_1 – фазний струм статора; φ_1 – кут зсуву фаз між струмом та напругою статора.

Корисна потужність P_2 менша за споживану P_1 на величину втрат, які поділяються на електричні, магнітні та механічні.

Електричні втрати спостерігаються в провідниках обмоток статора і ротора, на перехідному опорі між щітками та контактними кільцями й спричиняють їх нагрівання.

Завдяки тому, що частота струму f_2 у роторі при номінальному ковзанні мала (1-3 Гц), магнітні втрати (на гістерезис та вихрові струми) у осерді ротора незначні. Практично прийнято враховувати тільки магнітні втрати у осерді статора.

Потужність механічних втрат складається з втрат на тертя у підшипниках, щітках, втрат на охолодження двигуна, тощо.

Основною енергетичною характеристикою АД є ККД, який визначається відношенням корисної потужності P_2 на валу до споживаної активної потужності P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.5)$$

Механічною характеристикою АД називають залежність частоти обертання ротора від навантаження на валу n_2 (M_n). При виборі двигуна для приводу промислового механізму обирають такий двигун, механічна характеристика якого задовольняє умовам роботи механізму. Механічна характеристика, що відноситься до нормальних умов роботи двигуна, називається *природною* на відміну від *штучної* механічної характеристики, яка матиме місце у випадку, наприклад, вмикання в коло фазного ротора реостата.

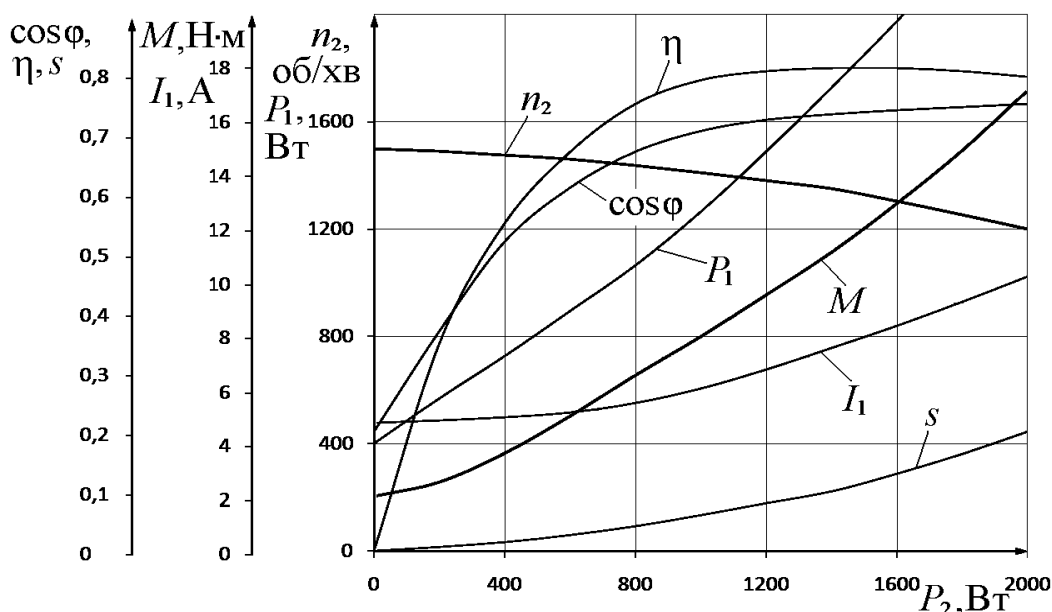


Рис. 4.2. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Залежності частоти обертання ротора n_2 , обертового моменту M , коефіцієнту потужності $\cos \varphi$, ККД η , споживаної двигуном потужності P_1 , струму статора I_1 , ковзання s від корисної потужності P_2 на валу прийнято називати *робочими характеристиками* двигуна. Всі робочі характеристики знімаються при номінальній частоті та напрузі живлення. Типові робочі характеристики АД представлені на рис. 4.2.



Проведення дослідів

1. Для випробовування асинхронного двигуна скласти схему, показану на рис. 4.3.

Схема містить трифазний асинхронний двигун з фазним ротором М, комплект вимірювальних приладів К50 (A_1 , V_1 , W_1) для визначення лінійних напруг, струмів та фазних потужностей. Пускові реостати R_2 приєднуються до фазних обмоток ротора двигуна. Вимикачі $QF1$, $QF2$ призначені відповідно для подачі живлення на обмотки статора та замикання накоротко фазних обмоток ротора.

Генератор постійного струму Г використовується як навантаження. Вимірювальні прилади (A_2 , V_2) призначені для вимірювання відповідно струму навантаження й напруги на затискачах якірної обмотки Я1, Я2. До затискачів Ш1, Ш2 обмотки збудження LHG подається живлення від джерела постійного струму 220 В через автоматичний вимикач $QF3$.

Тахогенератор BR з вольтметром V_3 призначені для визначення частоти обертання ротора двигуна.

Всі три машини M, G, BR з'єднані між собою механічно.

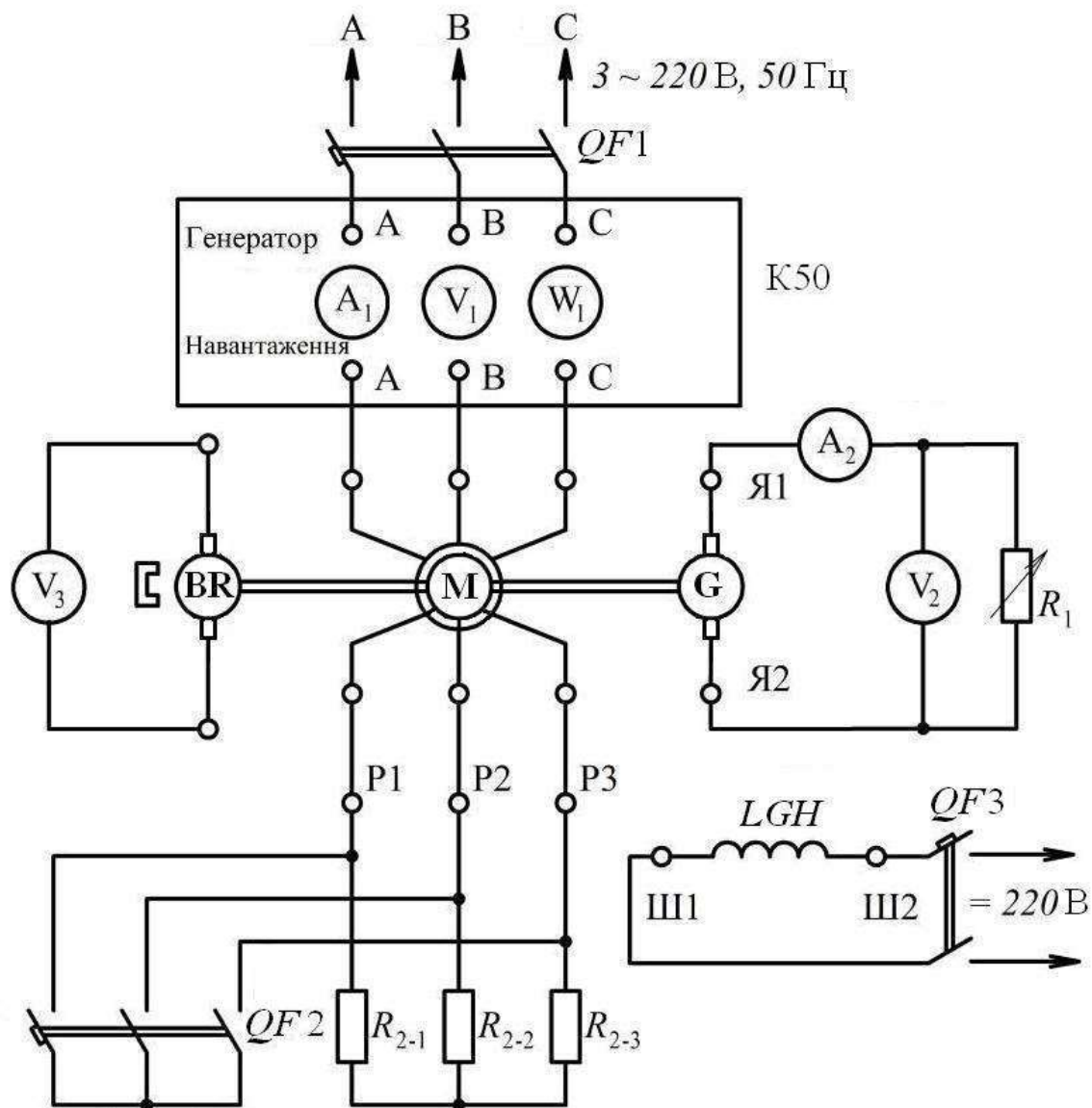


Рис. 4.3. Схема лабораторної установки

2. Записати паспортні дані досліджуваних машин у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Паспортні дані								Результати обчислень		
Найменування машини	Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{1\text{ном}}$, В	$I_{1\text{ном}}$, А	$n_{2\text{ном}}$, об/хв	$\cos\varphi$	η	n_1 , об/хв	$M_{\text{ном}}$, Н·м	p
Двигун										
Генератор										

3. Розімкнувши вимикач $QF2$, ввести повний опір пускових реостатів R_2 в коло роторних обмоток.

4. Для знімання природної характеристики, не збуджуючи генератор постійного струму G , ввімкнути вимикач $QF1$. Після того, як статорні обмотки двигуна будуть приєднані до джерела живлення, замкнути обмотки ротора (ввімкнути вимикач $QF2$). Зняти покази приладів при роботі двигуна в режимі холостого ходу (0).

Таблиця 4.2

Дані спостережень							Результати обчислень						
Режим	Двигун				Генератор								
	n_2 , об/хв	$U_{1л}$, В	$I_{1л}$, А	$P_{1ф}$, Вт	$U_{г}$, В	$I_{г}$, А							
Природна характеристика ($R_{\text{пуск}} = 0$)													
0													
1													
2													
3													
4													
5													
Штучна характеристика ($R_{\text{пуск}} = R_2$)													
0													
1													
2													
3													
4													
5													
Відмітки викладача								Оцінка		Підпис			

5. Увімкнувши вимикач $QF3$, приєднати обмотку збудження генератора LHG до джерела постійного струму. Змінюючи опір реостата R_1 , встановити необхідне навантаження двигуна. Результати дослідів записати в табл. 4.2 (1–5).

6. Для знімання штучної характеристики, розімкнути вимикач $QF2$, увівши в коло ротора реостати R_2 . Не збуджуючи генератор

постійного струму G (розімкнути $QF3$), зняти покази приладів при роботі двигуна в режимі холостого ходу (0). Увімкнувши вимикач $QF3$, приєднати обмотку збудження генератора LHG до джерела постійного струму. Змінюючи опір реостата R_1 , встановити необхідне навантаження двигуна. Результати дослідів записати в табл. 4.2.



Опрацювання результатів дослідів

1. За паспортними даними двигуна визначити:

$$\text{номінальний момент двигуна } M_{\text{ном}} = \frac{9,55 P_{\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}};$$

частоту обертання магнітного поля статора n_1 .

Результати занести у відповідні колонки таблиці 4.1.

❗ Частота обертання магнітного поля статора залежить від частоти струму в обмотці та кількості пар полюсів (4.1). При частоті $f_1 = 50$ Гц ряд частот (об/хв): 3000, 1500, 1000, 750, 600 і т.д. З ряду потрібно обрати найближчу до частоти обертання ротора $n_{2\text{ном}}$ (більшу) частоту. Маючи частоту обертання поля, кількість пар полюсів $p = \frac{60 f_1}{n_1}$.


2. Розрахувати такі величини:

- підведену до двигуна потужність $P_1 = 3P_{1\phi}$;
- потужність навантаження на валу двигуна $P_2 = \frac{U_{\Gamma} I_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}$ ($\eta_{\Gamma} = 0,85$);
- коефіцієнт потужності двигуна $\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{1\Gamma} I_{1\Gamma}}$;
- ковзання (4.3);
- момент двигуна $M = \frac{9,55 P_2}{n_2}$;
- ККД двигуна (4.5).

Результати занести у відповідні колонки табл. 4.2.

3. Побудувати робочі характеристики АД для випадку, коли $R_{\text{пуск}} = 0$.

4. Побудувати природну і штучну механічні характеристики АД, порівняти їх і зробити висновки.

 По горизонтальній осі (абсцис) відкладається момент M , по вертикальній осі (ординат) оберти ротора n_2 з відповідних колонок табл. 4.2.

Контрольні запитання

1. Пояснити будову та принцип дії АД з фазним ротором.
2. Від чого залежить частота обертання магнітного поля статора?
3. Що таке ковзання і як воно впливає на величину ЕРС та струму ротора?
4. Чому частота обертання ротора АД менша за частоту обертання магнітного поля?
5. Що називається механічною характеристикою двигуна?
6. Пояснити призначення реостатів у колі фазного ротора.
7. Пояснити робочі характеристики АД.

Лабораторна робота № 5 **ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ** **З ПАРАЛЕЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ**



Мета роботи

- Провести експериментальні дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням.
- На підставі проведених досліджень побудувати робочі, механічні, електромеханічні та регулювальні характеристики двигуна постійного струму.



Основні теоретичні положення

Машина постійного струму (МПС) – це оборотний електромеханічний перетворювач енергії, що найчастіше використовується як двигун. Основними перевагами двигунів постійного струму (ДПС) є можливість отримання великих пускових моментів та відносно легке регулювання їх частоти обертання.

До недоліків МПС можна віднести їх конструктивну складність, необхідність у джерелі постійного струму, а також меншу надійність

та більші габарити у порівнянні з двигунами змінного струму.

МПС складається нерухомої частини – статора і рухомої частини – якоря (рис. 5.1). *Статор* містить станину 1, до якої кріпляться головні полюси 2 та додаткові полюси 3. На головних полюсах розміщені котушки обмотки збудження 4, а на додаткових обмотка додаткових полюсів 5. Для отримання постійного значення магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом та якорем осердя головних полюсів мають наконечники спеціальної форми.

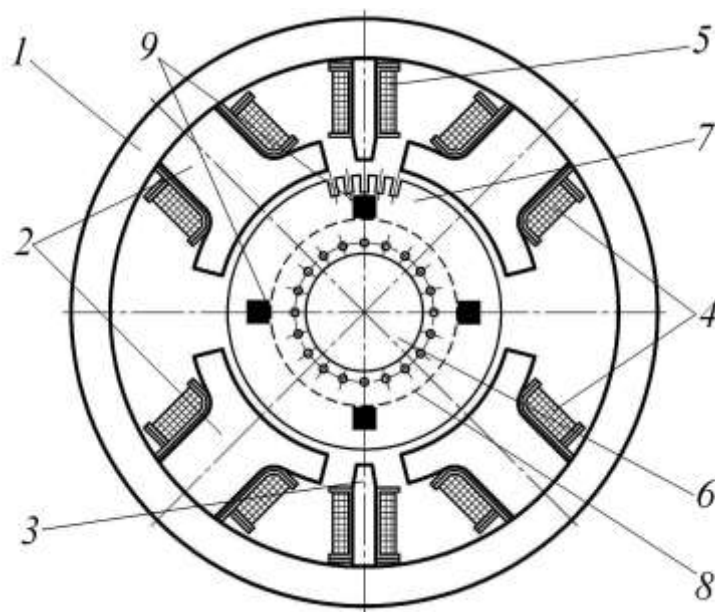


Рис. 5.1. Конструкція машини постійного струму

Якір МПС має закріплене на валу 6 циліндричне осердя 7, в пази якого вкладається обмотка якоря. Для зменшення втрат на гістерезис та вихрові струми, осердя виконується шихтованим.

Окремі секції обмотки якоря приєднуються до відповідних пластин колектора 8 (показаний пунктиром) по поверхні якого, при обертанні якоря, ковзають щітки 9, забезпечуючи таким чином контакт обмотки з мережею постійного струму.

Принцип роботи ДПС полягає у наступному. При підключенні двигуна до мережі в обмотці збудження починає протікати струм, який збуджує магнітний потік полюсів. У результаті взаємодії струму в провідниках обмотки якоря з магнітним полем полюсів виникає обертовий момент, що обертає якір.

Згідно закону електромагнітної індукції в провіднику обмотки якоря, що обертається, виникає ЕРС, спрямована протилежно до його струму

$$e_{\text{пр}} = BlV, \quad (5.1)$$

де l – довжина провідника; V – швидкість провідника; B – магнітна індукція. Щітки ділять обмотку якоря на $2a$ паралельних віток (a – число пар паралельних віток). Таким чином у кожній паралельній вітці з'єднуються $N/2a$ провідників, і середнє значення ЕРС якоря дорівнює

$$E = \frac{N}{2a} B_{\text{ср}} lV, \quad (5.2)$$

де N – кількість провідників; $B_{\text{ср}}$ – середнє значення магнітної індукції.

Швидкість провідника V можна виразити через частоту обертання якоря n , величину полюсного кроку τ і число полюсів $2p$:

$$V = \frac{2p n \tau}{60},$$

а магнітний потік одного полюса через добуток площі поверхні якоря, що припадає на один полюс $S_{\text{пол}}$ на середнє значення магнітної індукції в межах полюсного кроку

$$\Phi = B_{\text{ср}} S_{\text{пол}} = B_{\text{ср}} l\tau.$$

В підсумку ЕРС якоря запишеться

$$E_{\text{я}} = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = c_E \Phi n, \quad (5.3)$$

де $c_E = \frac{pN}{60a}$, – коефіцієнт ЕРС, що залежить від конструктивних особливостей машини.

Струм у обмотці якоря визначається таким виразом

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (5.4)$$

де U – напруга мережі; $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря.

Струм якоря, взаємодіючи з магнітним полем головних полюсів, спотворює його та погіршує умови роботи машини. Це явище

називається *реакцією якоря*.

На кожний з N провідників обмотки якоря діє сила Ампера

$$F_{\text{пр}} = lBI_{\text{пр}}.$$

Сума цих сил утворює електромагнітний момент, який діє на якір

$$M_{\text{ем}} = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^N F_{\text{пр}} = \frac{D}{2} NlB_{\text{ср}} I_{\text{пр}} = \frac{p}{2\pi a} N\Phi I_{\text{я}} = c_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (5.5)$$

де D – діаметр осердя якоря; $c_M = \frac{p}{2\pi a} N$ – коефіцієнт моменту.

В усталеному режимі цей момент зрівноважується моментом опору навантаження, що прикладене до валу двигуна.

При збільшенні навантаження рівновага моментів порушується і двигун почне зменшувати частоту обертів. Це спричинить зменшення ЕРС якоря (5.3) і збільшення його струму (5.4). Пропорційно до струму якоря збільшиться обертовий момент (5.5) і рівновага моментів відновиться.

Для того, щоб напрям електромагнітного моменту залишався постійним, колектор здійснює комутацію струму в обмотці ротора так, щоб напрям струму в тих провідниках, що знаходяться під одним полюсом залишався однаковим.

Число обертів якоря визначається виразом

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_E \Phi}. \quad (5.6)$$

З наведеного виразу видно, що частотою обертання якоря ДПС можна керувати шляхом зміни магнітного потоку Φ , зміни напруги U підведеної до обмотки якоря або введенням в коло якоря додаткового опору.

Щоб змінити напрям обертання якоря необхідно змінити полярність напруги, що прикладена до якоря або змінити напрям магнітного потоку головних полюсів.

Характеристики МПС залежать від способу підключення кола збудження по відношенню до кола якоря. У машинах з *незалежним збудженням* обмотка збудження живиться від окремого джерела, тому струм в ній не залежить від напруги живлення якоря.

При *паралельному збудженні* обмотка збудження підключається паралельно з обмоткою якоря до одного джерела напруги.

У машинах з *послідовним збудженням* обмотка збудження підключається послідовно з обмоткою якоря і має однаковий з ним струм.

Змішане збудження має місце у випадку, коли одна частина обмотки збудження підключається паралельно, а інша послідовно до обмотки якоря.

У двигуні з паралельним збудженням струм збудження не залежить від струму якоря та від навантаження двигуна (рис. 5.4). Пусковий реостат R_1 необхідний для того, щоб обмежити пусковий струм в якорі (5.4) доки не збільшиться ЕРС, яка пропорційна обертам якоря (5.3). Оскільки ЕРС пропорційна також потоку Φ , то при пуску обмотку збудження включають на повну напругу мережі при повністю виведеному опорі R_2 , який в подальшому використовують для регулювання обертів двигуна.

Залежність частоти обертання від струму якоря $n = f(I_{\text{я}})$ при зміні навантаження на валу ДПС називається *електромеханічною (швидкісною) характеристикою* (рис.5.2, а). Вигляд характеристики визначається впливом двох факторів: зміною спаду напруги $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ (5.6) та зміною основного потоку Φ , який зменшується через реакцію якоря.

Однією з найважливіших характеристик ДПС є *механічна характеристика* (рис.5.2, б), що являє собою залежність частоти обертання від обертового моменту на валу $n = f(M)$.

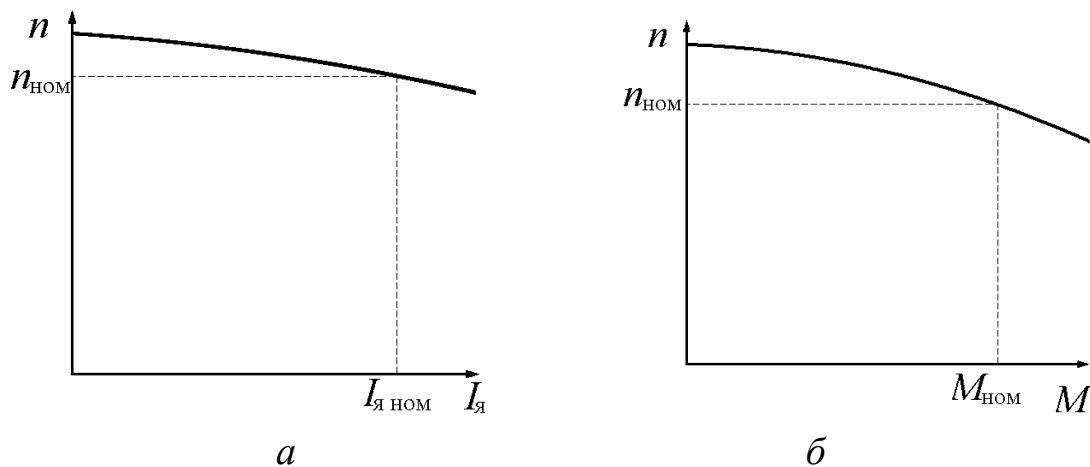


Рис. 5.2. Електромеханічна (а) і механічна (б) характеристики ДПС з незалежним збудженням

Механічна та електромеханічна характеристики називаються *природними*, якщо до двигуна підведена номінальна напруга і в його колах відсутні додаткові резистивні елементи. У зворотному випадку характеристики називаються *штучними*.

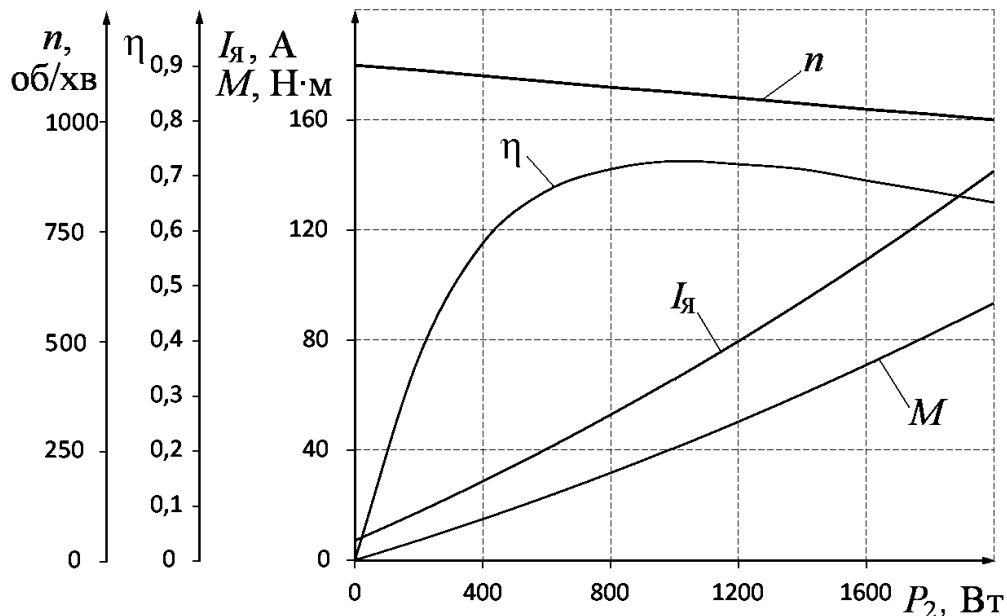


Рис. 5.3. Робочі характеристики ДПС

Робочі характеристики (рис. 5.3) визначають експлуатаційні властивості двигунів. До них належать залежності числа обертів n , обертового моменту M , струму якоря $I_{\text{я}}$ та ККД η від корисної потужності на валу, тобто n ; M ; $I_{\text{я}}$; $\eta = f(P_2)$. При цьому передбачається, що напруга живлення $U = U_{\text{ном}}$, струм збудження $I_{\text{зб}} = I_{\text{зб ном}}$ та відсутній додатковий опір у колі якоря.



Проведення дослідів

1. Провести огляд лабораторної установки та записати паспортні дані досліджуваних машин у табл. 5.1.
2. Скласти електричне коло відповідно до рис. 5.4 і перевірити пускорегульовальні та вимірювальні прилади.



Таблиця 5.1

46

За допомогою вольтметра V_3 вимірюється напруга тахогенератора, яка перераховується в частоту обертання. Реостати R_1 – пусковий, R_2 – регулювальний. ДПС живиться від джерела постійного струму 220 В через автоматичний вимикач $QF1$. До затискачів Ш1, Ш2 обмотки збудження генератора LHG подається живлення від джерела постійного струму 220 В через автоматичний вимикач $QF2$.

3. Встановивши максимальне значення опору R_1 , мінімальне значення опору R_2 , розімкнути вимикач S і запустити двигун.

4. Для знімання природних характеристик ДПС, встановити навантажувальний реостат R_3 в положення, що відповідає холостому ходу (0), замкнути вимикач S , а опір реостатів R_1 , R_2 встановити рівним нулю. Зняти покази приладів. Змінюючи опір навантажувального реостата R_3 провести серію дослідів. Результати вимірювань записати у таблицю 5.2.

5. Для знімання штучних характеристик ДПС, встановити навантажувальний реостат R_3 в положення, що відповідає холостому ходу (0), опори реостатів $R_1 \neq 0$, $R_2 = 0$. Змінюючи опір навантажувального реостата R_3 , провести серію дослідів.

6. Зняти регулювальну характеристику і записати результати вимірів у таблицю 5.3. Характеристика знімається за таких умов: вимикач S розімкнений, а R_1 виведений із кола якірної обмотки ($R_1 = 0$). Опір регулювального реостата R_2 змінюють ступінчасто від мінімального значення до максимального. Необхідно стежити за тим, щоб частота обертання не перевищувала номінальну більше ніж на 30%.

Таблиця 5.2

Дані спостережень							Результати обчислень					
Режим	Двигун				Генератор							
	n , об/хв	U , В	I_a , А	$I_{3б}$, А	U_r , В	I_r , А	P_1 , Вт	P_r , Вт	P_2 , Вт	M , Н·м	η	ω , рад/с
Природна характеристика ($R_1 = 0$)												
xx												
1												
2												
3												
4												
5												

Дані спостережень							Результати обчислень					
Режим	Двигун				Генератор							
	n , об/хв	U , В	$I_{я}$, А	$I_{зб}$, А	$U_{г}$, В	$I_{г}$, А	P_1 , Вт	$P_{г}$, Вт	P_2 , Вт	M , Н·м	η	ω , рад/с
Штучна характеристика ($R_1 \neq 0$)												
xx												
1												
2												
3												
4												
5												
Відмітки викладача								Оцінка		Підпис		

Таблиця 5.3

$I_{зб}$, А									
n , об/хв									
ω , рад/с									



Опрацювання результатів дослідів


1. За даними спостережень розрахувати:

- потужність, що споживається двигуном із мережі $P_1 = UI_{я} + UI_{зб}$;
- електричну потужність генератора $P_{г} = U_{г}I_{г}$, та потужність втрат генератора $\Delta P_{г} = \Delta P_{елг} + \Delta P_{мехг}$, де $\Delta P_{елг} = I_{г}^2 R_{яг}$ – потужність електричних втрат генератора; $\Delta P_{мехг} \approx 0,5 \Delta P_{елг} = 0,5 I_{г}^2 R_{яг}$ – потужність механічних втрат генератора, при цьому прийняти, $R_{яг} = 1$ Ом, тобто $\Delta P_{г} \approx 1,5 I_{г}^2$;
- корисну потужність на валу двигуна $P_2 = P_{г} + \Delta P_{г}$;
- момент на валу двигуна $M = \frac{P_2}{\omega} \approx \frac{9,55 P_2}{n}$;
- коефіцієнт корисної дії двигуна $\eta = \frac{P_2}{P_1}$;

- кутову швидкість обертання якоря двигуна $\omega = \frac{2\pi n}{60} \approx \frac{n}{9,55}$.

Результати занести у відповідні колонки таблиці 5.2.

2. Побудувати робочі характеристики ДПС для випадку $R_1 = 0$.
3. Побудувати природну і штучну механічну $n = f(M)$ та електромеханічну $n = f(I_a)$ характеристики ДПС.
4. За даними табл. 5.3 побудувати регулювальну характеристику $\omega = f(I_{зб})$.

 По горизонтальній осі (абсцис) відкладається струм збудження $I_{зб}$, по вертикальній осі (ординат) оберти якоря ω з відповідних колонок таблиці 5.3.



Контрольні запитання

1. Пояснити будову та принцип дії ДПС.
2. Від чого залежить частота обертання ДПС?
3. Призначення колектора ДПС.
4. Від чого залежить обертовий момент ДПС?
5. Пояснити призначення реостатів R_1 , R_2 , R_3 .
6. Що таке реакція якоря і як вона впливає на роботу машини?
7. Пояснити, як здійснюється запуск ДПС з паралельним збудженням.
8. Навести основні характеристики ДПС, пояснити різницю між природними та штучними характеристиками.
9. Способи збудження МПС.
10. Як здійснюється реверс ДПС з паралельним збудженням?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н.* Электротехника: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
2. *Городжа А.Д.* Загальна електротехніка: навч. посібник. – К.: КНУБА, 2000. – 248 с.
3. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.* Основы теории цепей: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
4. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
5. *Касаткин А.С., Немцов М.В.* Электротехника: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с.
6. *Кацман М.М.* Электрические машины – М.: Высшая школа, 1983. – 431 с.
7. *Костенко М.П., Пиотровский Л.И.* Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2. – Машины переменного тока: учеб. для вузов – Л.: Энергия, 1973. – 648с.
8. *Мілих В.І., Шавьолкін О.О.* Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник. – К.: Каравела, 2008. – 688 с.
9. *ДСТУ 2843-94.* Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. – Чинний з 01.01.96.
10. *ДСТУ 2815-94.* Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення. – Чинний з 01.01.96.

Зразок титульної сторінки протоколу лабораторної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

Кафедра електротехніки та електроприводу

Дисципліна: "Електротехніка в будівництві"

Лабораторна робота № 1

"Дослідження явища резонансу струмів
в електричних колах змінного струму"

Виконав: студент групи ТВ 31
Гришко П.С.


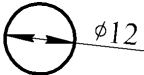
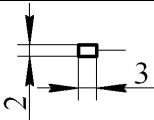
Перевірив: _____

" ____ " _____ 201__р.

КИЇВ 2010

Умовні графічні позначення елементів на електричних схемах

Назва елемента	Позначення	Графічне зображення
Діод	<i>VD</i>	
Індуктивність	<i>L</i>	
Заземлення		
Запобіжник	<i>FU</i>	
Конденсатор постійної ємності	<i>C</i>	
Конденсатор змінної ємності	<i>C</i>	
Контакт замикаючий	<i>S</i>	
Контакт розмикаючий	<i>S</i>	
Вимикач автоматичний	<i>QF</i>	
Лампа сигнальна	<i>HL</i>	
Обмотка електричної машини	<i>L</i>	
Прилад показуючий	<i>P</i>	
Резистор постійний	<i>R</i>	
Резистор змінний	<i>R</i>	
Котушка реле	<i>K</i>	

Назва елемента	Позначення	Графічне зображення
Ротор електричної машини	M, G	
Статор електричної машини	M, G	
Щітка на колекторі		

Утворення кратних одиниць

Прийставка	Позначення	Множник
Тера	Т	10^{12}
Гіга	Г	10^9
Мега	М	10^6
Кіло	к	10^3
Гекто	г	10^2
Дека	да	10
Деци	д	10^{-1}
Сант	с	10^{-2}
Мілі	м	10^{-3}
Мікро	мк	10^{-6}
Нано	н	10^{-9}
Піко	п	10^{-12}
Фемто	ф	10^{-15}
Атто	а	10^{-16}

ДЛЯ НОТАТОК

Навчально-методичне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА В БУДІВНИЦТВІ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів які навчаються за напрямом підготовки 6.050502
"Інженерна механіка"

Укладачі: **БОНДАР** Роман Петрович
ДУБОВИК Ірина Володимирівна

Комп'ютерне верстання *А.Ю. Зозулі*

Підписано до друку 2010. Формат 60 × 84 _{1/16}
Ум. друк. арк. 3,25. Обл.-вид. арк. 3,5.
Тираж 50 прим. Вид. № 116/III-10. Зам. №

КНУБА, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680

E-mail: red-isdat@knuba.edu.ua

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі
Київського національного університету будівництва і архітектури

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
Видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.