

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



Кафедра електротехніки



**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
до виконання лабораторних робіт з дисциплін
«Електротехніка», «Електротехніка та електроніка»
(розділ «Електричні машини»)
для студентів неелектротехнічних спеціальностей**

**Дніпро
2021**

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



Кафедра електротехніки



**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
до виконання лабораторних робіт з дисциплін
«Електротехніка», «Електротехніка та електроніка»
(розділ «Електричні машини»)
для студентів неелектротехнічних спеціальностей**

**Дніпро
2021**

Матеріали методичного забезпечення до виконання лабораторних робіт з дисциплін: «Електротехніка», «Електротехніка та електроніка» (розділ «Електричні машини») для студентів неелектротехнічних спеціальностей / Упорядники: : Д.В. Циценков, О.В. Бобров, С.І. Федоров, Т.В. Лябова – Дніпро: НТУ "ДП", 2021. – 50 с.

Упорядники:

Циценков Дмитро Володимирович	–	завідувач кафедри електротехніки канд. техн. наук, доцент
Бобров Олексій Володимирович	–	канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки
Федоров Сергій Іванович	–	старший викладач кафедри електротехніки
Лябова Тетяна Валеріївна	–	асистентка кафедри електротехніки

Затверджено на засіданні кафедри електротехніки
(протокол № 3 від 04 березня 2021 р.)

Методичні вказівки написані на основі багаторічного досвіду, накопиченого на кафедрі електричних машин при викладанні дисциплін "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА", "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ" та суміжних з ними дисциплін.

Відповідальний за випуск Д.В. Циценков, завідувач кафедри електротехніки,
канд. техн. наук, доцент.

ВСТУП

У програму лабораторних робіт входять деякі контрольні, а також інші випробування, що дозволяють досліджувати різні режими роботи електричних кіл постійного та синусоїдального струму при різних схемах з'єднання, різних умовах навантаження та електричних машин і т.п.

Перед складанням схеми при проведенні лабораторних випробувань необхідно підрахувати очікувані граничні значення вимірюваних величин струму, напруги і потужності та підібрати прилади (амперметри, вольтметри і ватметри та інші прилади) з найближчими найбільшими межами вимірів.

Неправильний вибір меж виміру приладів може привести до зниження точності вимірів, якщо обрані прилади з надмірно великими межами, або до ушкодження приладів, якщо обрані межі вимірів недостатні.

Деякі прилади можуть мати кілька меж виміру на різних затискачах або положеннях перемикача. Наприклад, ватметри, що застосовуються в лабораторії можуть мати на послідовній обмотці дві межі, наприклад, 5 А та 10А, а на паралельній обмотці кілька меж, наприклад, 30; 75; 150; 300 В. Вольтметри можуть мати межі 75; 150; 300; 600 В. Для таких приладів рекомендується перед ввімкненням схеми встановити найбільші можливі межі, а після ввімкнення перейти на межі виміру більш близькі вимірюваним величинам. При ввімкненні схеми рекомендується також, якщо це можливо, зашунтувати амперметри, послідовні обмотки ватметрів і первинні обмотки трансформаторів струму.

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

$$a = \frac{b+c}{d} = \frac{5+7}{3} = 4H.$$

ПРАВИЛА БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЯХ КАФЕДРИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

При роботі в лабораторіях кафедри електротехніки 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.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТ-2/1.

ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРА ТА ПРИБЛИЗНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО НОМІНАЛЬНИХ ВЕЛИЧИН

Мета роботи Вивчити будову трансформатора, встановити його придатність для експлуатації за рівнем ізоляції струмопровідних частин, ознайомитися з методами орієнтовного визначення даних трансформатора: коефіцієнта трансформації, допустимих струмів первинної і вторинної обмоток, первинних і вторинних напруг і потужності.

Програма роботи

1. Вивчення конструкції трифазного трансформатора.
2. Вимірювання опору ізоляції обмоток.
3. Перевірка обмоток трансформатора на відсутність обривів.
4. Визначення числа витків обмоток і коефіцієнта трансформації.
5. Наближене визначення допустимих струмів обмоток.
6. Обчислення значень фазних напруг і струмів обмоток, а також потужності трансформатора.
7. Складання паспорта трансформатора.
8. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення конструкції трифазного трансформатора

Вивчити конструкцію трансформатора ТМШ-63-6/0.4, що є в лабораторії та встановити:

- спосіб складання сердечника: шихтований або стиковий;
- спосіб пресування листів сталі;
- спосіб ізоляції листів сталі;
- форму поперечного перерізу стержнів і ярма;
- визначити обмотки високої (ВН) і низької (НН) напруг;
- спосіб регулювання напруги.

Ознайомитися з конструкцією бака і введів.

Етап 2. Вимір опорів ізоляції обмоток

2.1. Мегомметром виміряти опір ізоляції усіх фаз обмоток ВН і НН щодо корпусу (K), а також між собою. Дані вимірів занести до табл. 1.1.

Розрахувати мінімально допустимий опір ізоляції $R_{\text{доп}}$ з урахуванням робочої напруги та записати в табл. 1.1. Згідно з ДСТУ, опір ізоляції машин низької напруги (до 1000 В), апаратів і ліній повинен бути не менше 1000 Ом на кожен

вольт робочої напруги.

Таблиця 1.1

Результати виміру та розрахунку опору ізоляції трансформатора

Виміряно									Розраховано
R_{A-K}	R_{B-K}	R_{C-K}	R_{A-a}	R_{B-b}	R_{C-c}	R_{a-K}	R_{b-K}	R_{c-K}	Мінімально припустимий опір ізоляції
МОм	МОм	МОм	МОм	МОм	МОм	МОм	МОм	МОм	МОм

2.3. Порівнявши результати вимірів з обчисленими припустимими значеннями опору ізоляції, зробити висновок про придатність трансформатора для використання за рівнем ізоляції обмоток.

Етап 3. Перевірка обмоток трансформатора ТСШ-2,5/0,5 на відсутність обривів і правильність маркування виводів обмоток

3.1. Зібрати схему згідно з рис. 4.1 і після перевірки її викладачем виконати пробне вмикання. Перевірити контрольну лампу, для чого потрібно замкнути кінці щупів між собою (щупи тримати за ізольовані частини).

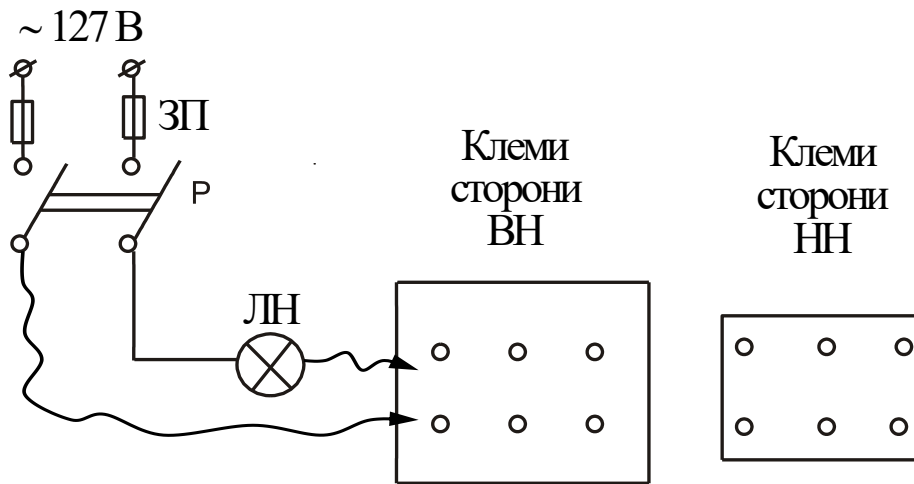


Рисунок 1.1 – Схема перевірки обмоток на відсутність обривів і правильність маркування виводів обмоток

3.2. Перевірити обмотки трансформатора ТСШ-2,5/0,5 на відсутність обривів. На ескізах клемних складань вказати маркування виводів обмоток ВН і НН.

Етап 4. Визначення числа витків обмоток і коефіцієнта трансформації

Число витків фази первинної W_1 і вторинної W_2 обмоток визначається за

допомогою допоміжної третьої обмотки, яку потрібно намотати (для зручності така обмотка вже намотана $W_3 = 20$ витків – **затискачі 1-2**).

Для визначення числа витків фази первинної W_1 і вторинної W_2 обмоток потрібно зібрати схему за рис. 1.2. Після перевірки її викладачем увімкнути та виміряти напругу на затискачах $A-X$, $a-x$, та $1-2$. Результати вимірів і розрахунків занести до табл. 1.2.

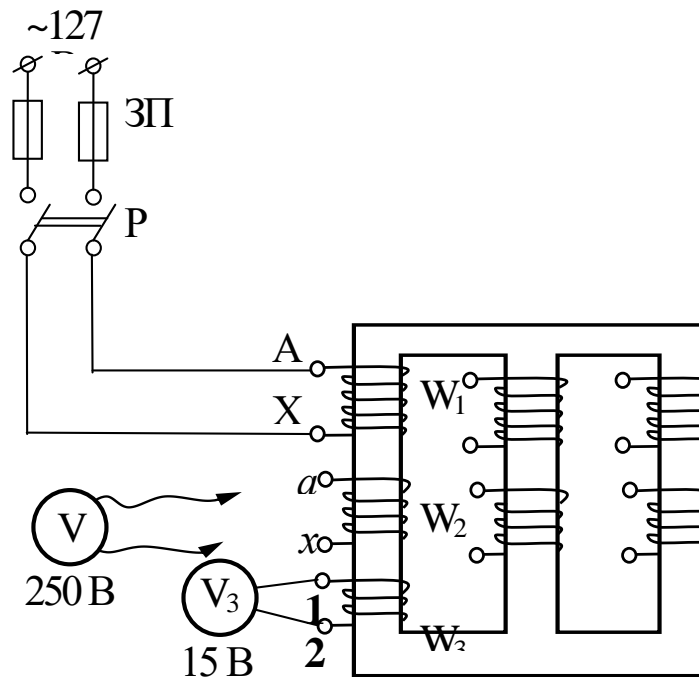


Рисунок 1.2 – Схема для визначення числа витків обмоток і коефіцієнта трансформації

Таблиця 1.2.

Результати визначення числа витків обмоток та коефіцієнта трансформації. Робоче місце № _____

Виміряно			Розраховано		
U_{AX}	U_{ax}	U_{12}	$k = \frac{U_{AX}}{U_{ax}}$	$W_1 = \frac{U_{AX}}{U_{12}} \cdot W_3$	$W_2 = \frac{W_1}{k}$
В	В	В	–	ВИТКІВ	ВИТКІВ

Етап 5. Наближене визначення струмів обмоток

5.1. Визначити діаметр проводу d_1 ($d_1 = 2$ мм) і розрахувати переріз q_1 проводу обмотки ВН, мм².

5.2. Визначити допустимий фазовий струм обмотки ВН:

$$I_{1\phi} = Jq_1, \text{ А},$$

де J - допустима густина струму для обмоток трансформаторів, $\text{А}/\text{мм}^2$.

Для сухих закритих трансформаторів допустима густина струму знаходиться в межах:

$$J = (1,2 \dots 1,4), \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

5.3. Визначити допустимий фазовий струм обмотки НН:

$$I_{2\phi} = kI_{1\phi}, \text{ А},$$

де k – коефіцієнт трансформації.

Етап 6. Обчислення орієнтовних значень ЕРС обмоток і потужності трансформатора

6.1 Зробити ескіз поперечного перерізу стержня, вказати розміри та визначити його площу $\Pi_{ст}, \text{ см}^2$.

6.2 Обчислити площу поперечного перерізу сталі сердечника:

$$\Pi_c = k_3 \Pi_{ст}, \text{ см}^2,$$

де k_3 – коефіцієнт заповнення перерізу стержня сталлю. Величина k_3 залежить від роду межлистової ізоляції:

$k_3 = (0,92 \dots 0,95)$ – для листів, ізольованих лаком.

6.3 Визначити фазові ЕРС обмоток:

$$E_{1\phi} = 4,44 f_1 W_1 B_m \Pi_c \cdot 10^{-4}, \text{ В},$$

де $B_m = (1,0 \dots 1,2)$, $Tл$ – рекомендовані значення індукції в стержнях сухих трансформаторів; $f_1 = 50 \text{ Гц}$ – частота струму мережі.

$$E_{2\phi} = \frac{E_{1\phi}}{k}, \text{ В}.$$

6.4 Оскільки $U_{1\phi} \approx E_{1\phi}$, а $U_{2\phi} \approx E_{2\phi}$, то отримані значення ЕРС округлити до найближчих стандартних.

Стандартні напруги обмоток трансформаторів до 1000 В:

обмоток ВН: ... 127; 220; 380; 660 В,

обмоток НН: ... 133; 230; 400; 690 В.

6.5 Розрахувати потужність трансформатора:

$$S = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cdot 10^{-3}, \text{ кВ}\cdot\text{А}$$

Отримане розрахункове значення потужності округлити до найближчого стандартного.

Стандартний ряд потужностей шахтних освітлювальних сухих трансформаторів:

$$1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,3, \dots \text{кВ}\cdot\text{А}$$

6.6 Розрахувати номінальні фазні струми обмоток з урахуванням прийнятих в п.п. 6.4 та 6.5 значень $U_{1\text{нф}}$, $U_{2\text{нф}}$ та $S_{\text{н}}$:

$$I_{1\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}} \cdot 10^3}{3U_{1\text{нф}}}, \text{ А};$$

$$I_{2\text{нф}} = I_{1\text{нф}} k, \text{ А}.$$

Етап 7. Складання паспорта трансформатора

7.1 Розрахувати лінійні напруги і струми трансформатора при різних схемах з'єднання обмоток (див. л/р № 3) та записати їх у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Паспортні дані трансформатора

$S_{\text{н}},$ $\text{кВ}\cdot\text{А}$	Схема з'єднання обмоток	Обмотки ВН		Обмотки НН	
		$U_{1\text{л.н}}, \text{В}$	$I_{1\text{л.н}}, \text{А}$	$U_{2\text{л.н}}, \text{В}$	$I_{2\text{л.н}}, \text{А}$
	Y/Y				
	Δ/Δ				

Етап 9. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

- 9.1. Найменування роботи, її програму та мету.
- 9.2. Результати вимірювань і обчислень по всіх пунктах програми, що занесені в таблиці 1.1, 1.2, 1.3.
- 9.3. Схеми за рис. 1.1, 1.2.
- 9.4. Ескіз поперечного перерізу стержня з розмірами.

Контрольні запитання

1. Що називають трансформатором?
2. Яке призначення має трансформатор?

3. Де застосовують трансформатор?
4. Призначення і будова окремих елементів трансформатора: магнітної системи, обмоток, бака, виводів, а також системи охолодження?
5. Яку мають будову однофазні трансформатори стержневого і броньового типів?
6. Яку має будову трифазний трансформатор?
7. Які матеріали використовуються для виготовлення магнітної системи силових трансформаторів?
8. Які існують способи складання магнітопроводів трансформаторів?
9. Які існують способи ізоляції листів сталі? Яке призначення має ізоляція листів сталі?
10. З якою метою стрижні силових трансформаторів виконуються з поперечним перерізом східчастої форми?
11. Дайте пояснення, чому магнітний потік трансформатора практично не залежить від навантаження.
12. Чому трансформатори не працюють від мережі постійного струму?
13. Що таке коефіцієнт трансформації напруги? Чим відрізняється фазний коефіцієнт трансформації від лінійного?
14. Як визначити фазний і лінійний коефіцієнти трансформації розрахунковим шляхом?
15. Як визначити коефіцієнт трансформації експериментальним шляхом? Схема досліду. Чи можна визначити коефіцієнт трансформації при нарузі, що відрізняється від номінальної?
16. Як визначити допустимі струми в обмотках трансформатора?
17. Як визначити напруги обмоток трансформатора?
18. Назвіть можливі схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів? Як вибрати необхідну схему з'єднання обмоток?
19. Чи можна вмикати трансформатор на постійну напругу, що дорівнює номінальній. Чому?

Список рекомендованої літератури

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Циценков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 7.1 – 7.3, с. 143 – 162).
2. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навч. посібник – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 327 с. (§ 1.1 – 1.5. с. 7 – 25).
3. Брускін Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с. (§ 2.1 – 2.4 с. 15 – 32).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТ 2/2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Мета роботи Вивчити конструкцію трифазних асинхронних двигунів з фазним та короткозамкненим роторами; умови створення обертового магнітного поля. З'ясувати принцип дії асинхронного двигуна. Виконати наладку асинхронного двигуна, здійснити його пуск і реверсування.

Програма роботи

1. Вивчення будови асинхронних двигунів з фазовим і короткозамкненим роторами.
2. Вивчення умов створення обертового магнітного поля.
3. Зображення статора, фазного та короткозамкненого роторів.
4. Встановлення можливості вмикання двигуна.
5. Маркування виводів фаз обмотки статора та визначення опору ізоляції обмоток.
6. Вмикання двигуна в мережу і реверсування.
7. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення будови асинхронних двигунів з фазним і короткозамкненим роторами

Ознайомитися з номінальними даними трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що досліджується, та розрахувати:

- номінальний момент – $M_{ном}$;
- синхронну частоту обертання – n_1 ;
- споживану потужність – $P_{1ном}$;
- номінальне ковзання – $s_{ном}$;
- кількість полюсів – $2p$.

При розрахунках прийняти, що частота мережі складає 50 Гц .

Номінальні дані двигуна та результати розрахунку занести в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Номінальні дані асинхронного двигуна та результати розрахунку. Робоче місце № ____

Номінальні дані двигуна							Розрахункові дані					
$U_{1ном}$	$I_{1ном}$	$P_{2ном}$	$n_{ном}$	$\eta_{ном}$	$\cos \varphi$	f_1	$2p$	n_1	$s_{ном}$	$\omega_{ном}$	$M_{ном}$	$P_{1ном}$
В	А	кВт	об/хв	$\%$		Гц		об/хв		рад/с	$\text{Н}\cdot\text{м}$	Вт

Етап 2. Вивчення умов створення обертового магнітного поля

Використовуючи діючий макет трифазної обмотки, переконайтеся у можливості створення:

- магнітного поля однієї фази;
- магнітного поля трьох фаз;
- магнітного поля двох фаз при живленні двофазною несиметричною системою струмів;
- магнітного поля двох фаз при живленні однофазним струмом.

Одна фазна обмотка, живлячись змінним струмом, створює нерухоме в просторі магнітне поле, вісь якого перпендикулярна площині котушки цієї фази.

Дві фазові обмотки, що живляться змінним струмом також створюють результуюче поле, яке нерухоме у просторі, вісь якого при відповідному з'єднанні обмоток ($H_1-K_1-H_2-K_2$) перпендикулярна площині котушки третьої фази.

Трифазна симетрична обмотка, яка живиться трифазною системою струмів, при правильному (відповідному) з'єднанні обмоток (див. методичні вказівки до етапу 5) створює магнітне поле, що обертається в просторі.

Кількість полюсів машини можна визначити експериментально, якщо приєднати одну з фаз статора з вийнятим ротором до джерела постійного струму. В якості індикатора використовують сталеву стрілку.

Підключивши цей статор до джерела трифазного змінного струму, за допомогою сталевий стрілки можна встановити наявність обертового магнітного поля і напрям його обертання.

Розташуйте на внутрішній поверхні осердя статора металеву кульку. Дайте пояснення, чому кулька перекочується по внутрішній поверхні зі значно меншою частотою обертання вбік, протилежний напрямку обертання обертового магнітного поля.

Етап 3. Зображення статора, фазного та короткозамкненого роторів

Накреслити ескізи статора і двох роторів з фазною і короткозамкненою обмотками, на яких чітко відзначити характерні деталі: осердя, обмотки, контактні кільця, щітки.

Етап 4. Встановлення можливості вмикання двигуна

Перевірити справність механічних елементів двигуна: цілість корпусу, підшипникових щитів, кришок ввідного пристрою, наявність мастила підшипників та інше. Обертаючи рукою вал двигуна, переконайтеся, що ротор не зачіпляється за осердя статора, вентилятор – за корпус, немає затирання в підшипниках.

В АД з фазним ротором перевіряють також стан та якість контактних кілець та щіткового апарата, щільність прилягання щіток до кілець.

Деякі асинхронні двигуни виготовляються для живлення від мереж з

напругою одного значення (наприклад, двигуни з $U_{\text{ном}} = 660 \text{ В}$). У цьому випадку на клемну панель двигуна виводяться тільки три виводи – початки фазних обмоток, а міжфазові з'єднання за відповідною схемою виконуються в лобових частинах обмоток (так звані "глуха зірка" або "глухий трикутник").

Більшість двигунів може підключатися до мереж двох рівнів напруги, відмінних в $\sqrt{3}$ раз (220/380; 380/660). В цьому випадку на клемній панелі двигуна розташовуються обидва виводи від кожної фази. Фазові обмотки з'єднуються між собою в "трикутник" при низькій напрузі в мережі або в "зірку" – при підключенні до мережі з напругою в $\sqrt{3}$ раз більшою. При цьому фазні напруги на обмотках двигуна залишаються однаковими. Для правильного з'єднання фазних обмоток між собою треба знати "початки" і "кінці" фазних обмоток.

Етап 5. Маркування виводів фаз обмотки статора та визначення опору ізоляції обмоток

Обов'язковою умовою створення колового обертового магнітного поля є симетричність обмотки, що створює це поле. Симетричні обмотки складаються з декількох (m) однакових фазних обмоток, зсунутих в пазах статора на однаковий кут. Якщо в асинхронній машині кількість пар полюсів більше ніж 1 ($p > 1$), то фазові обмотки рівномірно зсунуті в просторі на кут $\alpha = \frac{360}{m \cdot p}$ електричних градусів (ел. град.).

Позначення виводів трифазних машин змінного струму залежно від призначення обмоток наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Позначення виводів трифазних машин змінного струму

Виводи обмоток	Згідно з нормативними документами (ДСТУ)	Згідно зі стандартами МЕК ¹	У навчальній літературі
Початки фазних обмоток статора	C ₁ ; C ₂ ; C ₃	U ₁ ; V ₁ ; W ₁	A; B; C
Кінці фазних обмоток статора	C ₄ ; C ₅ ; C ₆	U ₂ ; V ₂ ; W ₂	X; Y; Z
Виводи фазних обмоток ротора	P ₁ ; P ₂ ; P ₃	K; L; M	P ₁ ; P ₂ ; P ₃

При виконанні лабораторних робіт рекомендується користуватися загальноприйнятим маркуванням, що використовується в навчальній літературі.

У процесі експлуатації заводське маркування може бути загублене або не відповідати дійсності (наприклад, після ремонту). Тому важливою при налазці

¹ МЕК – міжнародна електротехнічна комісія.

двигунів є задача визначення початків і кінців фазних обмоток, розв'язання якої наведено нижче.

5.1. Виводи фазних обмоток приєднуються до щитка (у лабораторних умовах) у довільному порядку і за допомогою омметра, вольтметра або лампи розжарювання визначаються виводи фазних обмоток, які помічаються цифрами: $1 - 1'$; $2 - 2'$; $3 - 3'$.

При використанні лампи розжарювання збирається схема, яка зображена на рис. 2.1.

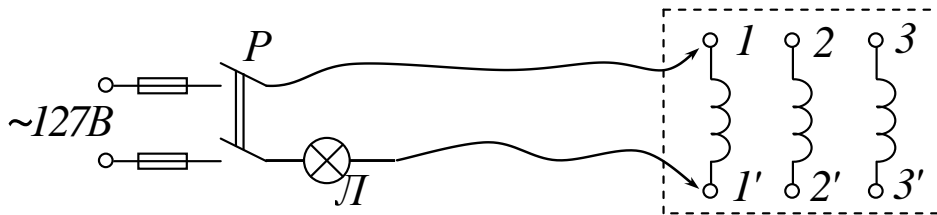


Рисунок 2.1 – Схема для визначення виводів фаз обмотки статора

У результаті виконання даного досліду виводи однієї фази повинні розташовуватися один над одним. Якщо виявиться, що виводи однієї фази розташовані на різних клеммах (наприклад, на клемі, позначеній цифрою 1 та на клемі, позначеній цифрою 2') необхідно поміняти місцями виводи обмотки статора асинхронного двигуна, які приєднані відповідно до клем позначених цифрою зі штрихом (відповідно до наведеного прикладу виводи, приєднані до клем 2' та 1').

5.2. Після цього виводи однієї з фаз маркується буквами "А" і "Х" (довільно) і збирається схема за рис. 2.2.

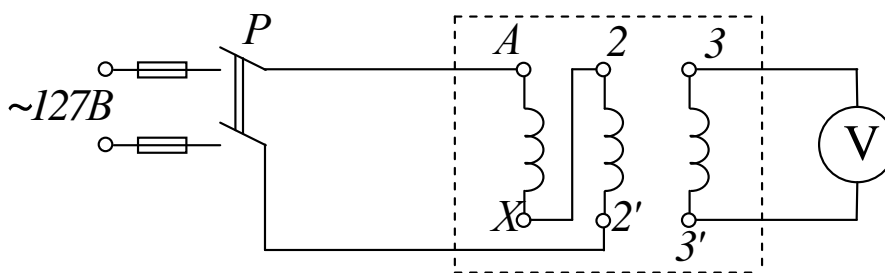


Рисунок 2.2 – Схема для виконання маркування виводів обмоток статора

За цією схемою кінець першої фази Х з'єднується з будь-яким виводом другої фази ($2 - 2'$). До послідовно увімкнених фаз підводиться однофазна змінна напруга. На затискачі вільної фази ($3 - 3'$) вмикається вольтметр. Якщо після вмикання рубильника P вольтметр покаже наявність напруги на виході третьої обмотки, робиться висновок, що кінець першої фази "Х" з'єднаний з початком другої фази "В" (пояснення цього ефекту описано в методичних вказівках до роботи). Відсутність показань вольтметра свідчить про те, що кінець першої фази

"X" з'єднаний з кінцем другої фази "Y".

У разі відсутності показань вольтметра рекомендується переконатися в тому, що це не зв'язано з обривом електричного кола. Якщо в колі обмоток протікає струм, то магнітний потік, що створюється у магнітній системі двигуна, викликає "магнітні шуми", які можна відчувати, приклавши руку до корпусу двигуна.

При відсутності показань вольтметра необхідно змінити взаємне положення проводів обмотки $2 - 2'$, що йдуть від двигуна на протилежне та добитися показання вольтметра.

Аналогічним чином маркуються виводи третьої фази "CZ".

Після закінчення цього досліду на верхніх затискачах повинні бути розташовані всі початки обмоток, а на нижніх – кінці.

Етап 6. Увімкнення двигуна в мережу і реверсування

Визначити, за якою схемою (Δ або Y) необхідно з'єднати обмотки статора двигуна при підключенні до даної трифазної мережі.

Схема вмикання двигуна в мережу складається з врахуванням напруги мережі. Вона повинна містити:

- апарат управління – автоматичний вимикач;
- апарат захисту від коротких замикань – плавкі запобіжники.

Після збірки схему перевіряє викладач, далі здійснюється запуск в хід двигуна, а потім – зміна напрямку обертання його – реверсування.

Якщо при запуску двигун працює ненормально (підвищені шуми, знижена частота обертання) його треба негайно вимкнути, знайти і усунути несправності: перевірити правильність збірки схеми та маркування виводів.

Етап 7. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування і мету роботи.
2. Заводські дані машини і додаткові дані, отримані розрахунковим шляхом (табл. 2.1).
3. Схеми експериментальних досліджень (рис. 2.1 і 2.2) та схему увімкнення двигуна в мережу (накреслити самостійно).
4. Розрахунки значень n_1 , $s_{\text{ном}}$, $2p$, $\omega_{\text{ном}}$, P_1 та $M_{\text{ном}}$ за номінальними даними двигуна.
5. Визначення понять з п. 17 контрольних запитань.

Методичні вказівки

До етапу 1

Номинальний момент двигуна

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55 P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де $P_{\text{НОМ}}$ – номинальна потужність двигуна (потужність на валу), *Вт*; $n_{\text{НОМ}}$ – частота обертання ротора при номинальному навантаженні, *об/хв*; $\omega_{\text{НОМ}}$ – кутова частота обертання ротора при номинальному навантаженні, *рад/с*

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi n_{\text{НОМ}}}{60} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30}, \text{ рад/с}.$$

Потужність, що споживається двигуном з мережі

$$P_1 = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}, \text{ Вт}$$

або

$$P_1 = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}}, \text{ Вт}.$$

Номинальне ковзання

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1},$$

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

Синхронна частота обертання (частота обертання поля машини)

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ об/хв},$$

де f_1 – частота струму мережі, *Гц*; p – кількість пар полюсів машини.

Якщо кількість пар полюсів обмотки статора визначити не вдається, синхронну частоту обертання можна визначити як найближче, більше по відношенню до $n_{\text{НОМ}}$ синхронне число. Ряд синхронних частот обертання (при частоті мережі 50 Гц): 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/хв і т.д.

До етапу 5

Обмотки статора трифазних двигунів складаються з трьох фаз, мають однакові параметри і зсунуті у просторі на 120 *ел. град*.

Для можливості використання двигуна при двох стандартних напругах мережі на клемну коробку двигуна, як правило, вмонтовуються 6 виводів – по два від кожної фази. Для правильного виконання схеми трифазної обмотки необхідно знати виводи кожної фази (початки та їх кінці).

Виводи кожної фази визначаються мегомметром, вольтметром або лампою як два затискачі, між якими існує електричний зв'язок.

Один з методів, що дозволяє визначити початки і кінці фазних обмоток, ґрунтується на такому ефекті.

Розглянемо найпростішу трифазну машину змінного струму, кожна фаза якої складається з однієї котушки та $2p = 2$. Початки котушок позначені A, B, C , кінці, відповідно, X, Y, Z .

Кожна котушка, по якій протікає змінний струм, створює пульсуюче магнітне поле, вектор якого перпендикулярний площині котушки, а його напрямок в кожному мить часу визначається правилом буравчика. Дві послідовно з'єднані котушки, які живляться змінним струмом, створюють результуюче пульсуюче магнітне поле, орієнтація вектора якого щодо третьої котушки залежить від способу увімкнення двох перших.

Якщо ці дві котушки увімкнені таким чином, щоб кінець першої котушки був з'єднаний з початком другої, то вектор результуючого пульсуючого поля буде орієнтований перпендикулярно площині третьої котушки і в ній індукуватиметься ЕРС.

У цьому легко переконатися, розглянувши схему на рис. 2.3, задавшись для якої-небудь миті часу напрямком змінного струму. Магнітні потоки першої котушки ($A-X$) – Φ_A та другої котушки ($B-Y$) – Φ_B , підсумовуючись, створюють результуючий магнітний потік $\Phi_{рез}$, вектор якого перпендикулярний площині третьої котушки та індукує в ній ЕДС, наявність якої визначається вольтметром V .

Якщо розглянуті дві котушки увімкнуті таким чином, щоб кінець першої котушки був з'єднаний з кінцем другої, то вектор результуючого пульсуючого поля $\Phi_{рез}$ буде лежати в площині третьої котушки і ЕРС в ній індукуватися не буде (можна переконатися в цьому, склавши відповідну схему і виконавши необхідні побудови).

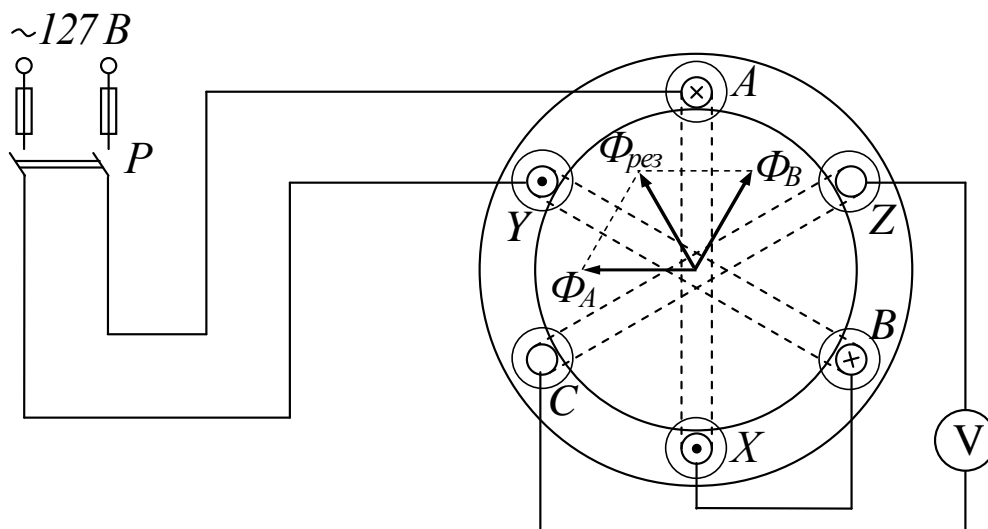


Рисунок 2.3 – Схема, до пояснення ефекту визначення початків і кінців фазних обмоток

До етапу 6

Фазові обмотки з'єднуються між собою в "трикутник" при низькій напрузі в мережі або в "зірку" при підключенні до мережі з напругою в $\sqrt{3}$ раз більшою.

Наприклад, в асинхронних двигунів, у яких в паспортній табличці зазначено, що вони працюють при напрузі 220/380 В, обмотку статора з'єднують за схемою "трикутник" при роботі в мережі з лінійною напругою 220 В, а коли в мережі лінійна напруга складає 380 В обмотку статора вмикають за схемою "зірка". В обох випадках фазна напруга на обмотках двигуна буде складати 220 В.

При розробці схеми увімкнення двигуна в мережу слід враховувати, що вона повинна містити пускову апаратуру (автоматичні вимикачі, магнітні пускачі, пускові реостати для двигунів з фазним ротором) і апаратуру захисту (плавкі запобіжники, теплові, струмові реле та інші апарати захисту).

Для здійснення реверсування асинхронного двигуна необхідно змінити порядок чергування фаз двигуна, що викличе зміну напрямку обертання магнітного поля, а воно, у свою чергу, – зміну напрямку обертання вала двигуна.

Контрольні запитання

1. Дайте словесне визначення поняття "асинхронна машина".
2. Дайте визначення поняття "синхронна частота обертання" та наведіть ряд синхронних частот обертання для частоти мережі 50 Гц.
3. Укажіть умови для створення обертового магнітного поля.
4. Поясніть принцип дії асинхронного двигуна.
5. Укажіть переваги і недоліки асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.
6. Укажіть переваги і недоліки асинхронних двигунів з фазним ротором.
7. Укажіть взаємозв'язок між числом полюсів, частотою живильної напруги і частотою обертання ротора асинхронної машини.
8. У чому складається дослідний та розрахунковий способи визначення числа полюсів машини?
9. Яким способом можна встановити, що обмотка створює обертове магнітне поле?
10. З якою метою треба вимірювати опір ізоляції обмоток двигуна?
11. Яким чином можна змінити напрям обертання ротора асинхронного двигуна (реверсувати двигун)?
12. За якою схемою треба з'єднати фазові обмотки статора, якщо на щітку заводських даних вказана номінальна напруга 380/660 В, а в цеху є трифазна мережа змінного струму з лінійною напругою 660 В?
13. Трифазний двополюсний асинхронний двигун при номінальному навантаженні має ковзання 5,4 %. Чому дорівнює частота обертання ротора, якщо частота змінного струму статора 50 Гц?
14. Чи може трифазний асинхронний двигун при наявності трьох пар полюсів і критичному ковзанні 12 % мати частоту обертання 860 об/хв?
15. Трифазний асинхронний двигун споживає від мережі потужність 9,55 кВт при струмі 36,36 А та напрузі 220 В. Визначити ККД і $\cos \phi$, якщо корисна потужність на валу двигуна 27,5 кВт.

16. На якому принципі ґрунтується метод визначення початків і кінців виводів обмоток статора?

17. Дайте визначення поняттям:

- | | |
|--|---------------------------------|
| – номінальна напруга (лінійна та фазна); | – номінальний струм; |
| – номінальна потужність; | – номінальна частота обертання; |
| – номінальний ККД; | – номінальний $\cos \varphi$; |
| – номінальне ковзання; | – потужність, що споживається. |

Список рекомендованої літератури

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 8.1, с. 178 – 181).

2. Півняк Г.Г, Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 327с. (§ 8.1 – 8.5. с. 92 – 123).

3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины: Учебник. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с. (§ 5.1 – 5.2. с. 160 – 168).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТ-2/3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мета роботи Ознайомитися з технікою і методикою дослідження двигунів методом безпосереднього навантаження, отримані експериментально дані використати для побудови робочих характеристик асинхронного двигуна.

Програма роботи

1. Вивчення лабораторного стенду.
2. Розрахунок моментів навантаження.
3. Проведення експерименту, обробка даних та побудова робочих характеристик.
4. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення будови лабораторного стенду

Оглянути двигун, перевірити його механічну справність, встановити напрям обертання. Заводські дані двигуна записати в табл. 3.1.

Ознайомитися з особливостями лабораторного стенду (рис. 3.1) та принципом дії електромагнітного гальма.

Таблиця 3.1.

Заводські дані двигуна. Робоче місце № _____

Тип двигуна, Схема з'єднання обмоток	$P_{ном}$, кВт	$U_{1ном}$, В	$I_{1ном}$, А	$n_{ном}$, об/хв	f_1 , Гц	$\eta_{ном}$, %	$\cos\varphi_{ном}$

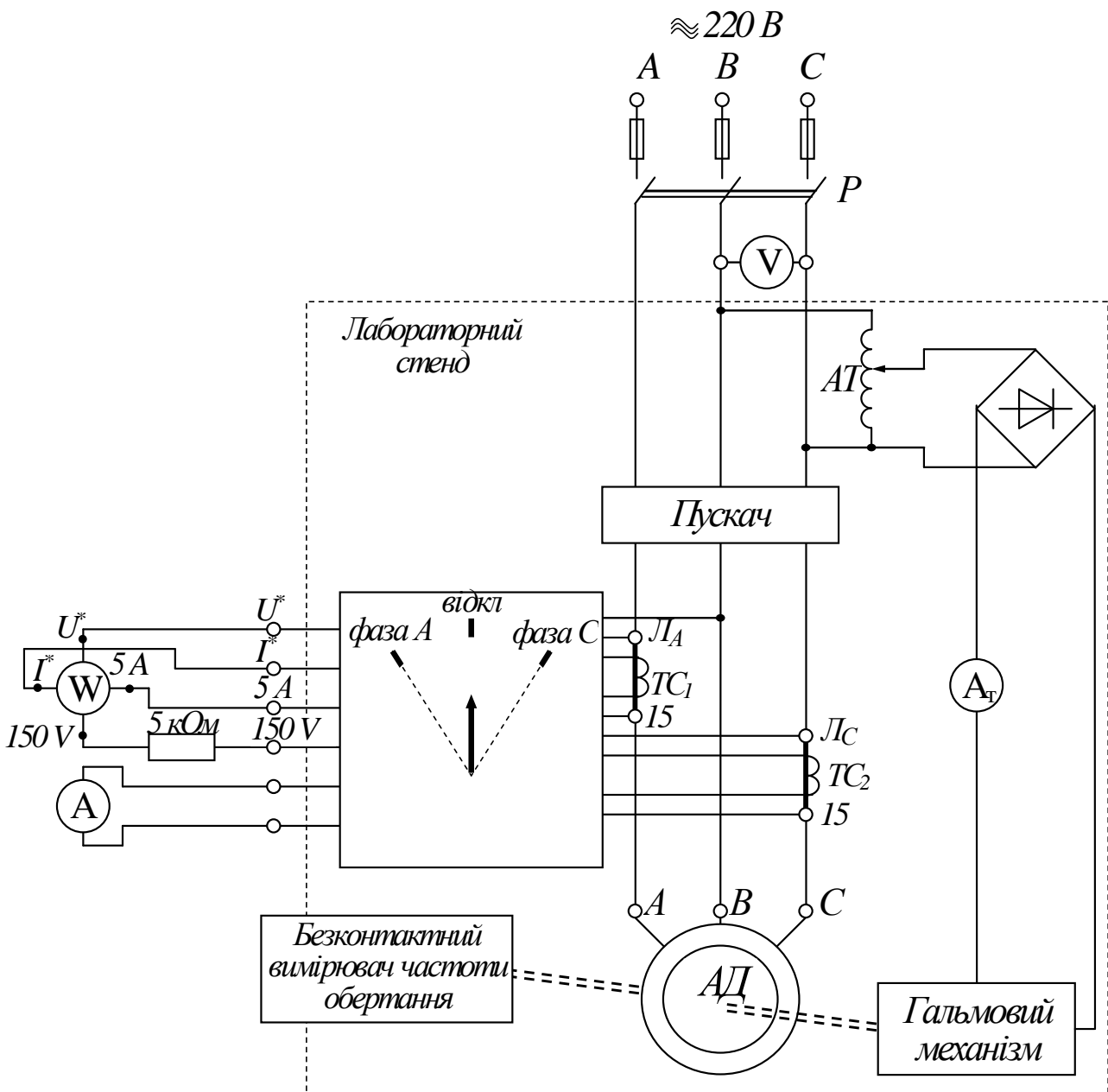


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного стенду з дослідження асинхронного двигуна при безпосередньому навантаженні

Етап 2. Розрахунок моментів навантаження

Рекомендується при експерименті створювати на валу двигуна моменти навантаження, рівні приблизно $M_{\text{нав}} = (1.2; 1.0; 0.75; 0.5; 0.25; 0) \cdot M_{\text{ном}}$. Розрахунок моментів навантаження здійснюється в такому порядку :

- визначається номінальний момент двигуна $M_{\text{ном}} = \frac{9550P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}$, де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт; $n_{\text{ном}}$ – номінальна швидкість обертання валу двигуна;
- розраховується момент навантаження.

Отримані значення моменту навантаження на валу двигуна (з точністю до другого знака після коми), що створюється за допомогою електромагнітного гальма, записати у табл. 3.2, а за шкалою електромагнітного гальма, при виконанні досліду відкладати ці значення.

Таблиця 3.2.

Дослідження робочих характеристик двигуна

№ п/п	Виміряно							Розраховано					
	M , Н·м	n , об/хв	U_1 , В	I_A , А	P_A , Вт	I_C , А	P_C , Вт	I_1 , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η , %	$\cos\varphi_1$, –	s , –
1													
2													
3													
4													
5													
6													

Етап 3. Дослідження робочих характеристик двигуна

Підключити вимірювальні пристрої (амперметр, вольтметр та ватметр) та додатковий резистор до відповідних ділянок та виводів схеми (рис. 3.1). Після перевірки викладачем правильності складання схеми подати напругу живлення та встановити в колі гальмового механізму мінімальний струм (мінімальне показання амперметра A_T) за допомогою автотрансформатора AT , створивши тим самим мінімальне навантаження на валу двигуна. Встановити перемикач приладів у середнє положення "відкл" та здійснити пуск двигуна за допомогою пускача.

За допомогою електромагнітного гальма (змінюючи положення регулятора автотрансформатора AT) створити необхідне навантаження на валу двигуна. При цьому стрілка на шкалі електромагнітного гальма зі зміною струму в колі гальмового механізму буде відхилятися на деякий кут, який відповідає навантаженню, що прикладається до валу двигуна.

Переводячи перемикач в положення "Фаза А" та положення "Фаза С" зняти показання приладів, з врахуванням впливу на їх ціни поділок трансформаторів струму та додаткових резисторів (коефіцієнт трансформації трансформаторів

струму T_{C1} та T_{C2} $K_T = 3$). Зняти показання приладів для кожного з розрахованих значень моменту навантаження на валу двигуна. Результати вимірювань занести в табл. 3.2 та розрахувати робочі параметри двигуна при заданих значеннях навантажувального моменту M (потужність, що споживається P_1 ; корисну потужність на валу P_2 ; коефіцієнт корисної дії η ; коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ та ковзання s) за формулами:

$$I_A = \frac{P_A + P_C}{2}; \quad P_1 = P_A + P_C, \text{ Вт}; \quad P_2 = \frac{n \cdot M}{9.55}, \text{ Вт}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

де n_1 – частота обертання магнітного поля (синхронна частота обертання) визначається як і в роботі *ЕТ– 2/2*.

Результати розрахунку занести в табл. 3.2.

Примітка: Показання ватметрів записувати з врахуванням знаків.

За даними табл. 3.2 побудувати в одній системі координат (у масштабі) робочі характеристики двигуна:

$$P_1 = f(P_2); \quad I_1 = f(P_2); \quad M = f(P_2); \quad n_2 = f(P_2); \quad \cos \varphi_1 = f(P_2); \quad s = f(P_2).$$

Етап 4. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування і мету роботи.
2. Таблицю 3.1 з заводськими даними двигуна.
3. Схему експериментальних досліджень (рис. 3.1).
4. Таблицю 3.2 з результатами вимірювань та розрахунків.
5. Розрахунок робочих параметрів двигуна для номінального моменту.
6. Робочі характеристики двигуна в одній системі координат (у масштабі).

Методичні вказівки

До етапу 1

Дослідний стенд складається з асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором, навантажувального механізму, безконтактного датчика частоти обертання вала двигуна, електромагнітного пускача та частково зібраного електричного кола вмикання двигуна. Для завершення складання електричного кола необхідно ввімкнути ватметр з додатковим опором, амперметр та вольтметр.

Навантажувальний механізм являє собою електромагнітне гальмо, в якому навантажувальний момент M створюється за рахунок силової взаємодії вихрових

струмів, що створюються магнітним полем електричних котушок з сталевим диском, закріпленим на валу двигуна. Котушки закріплені разом з вантажем з можливістю повороту навколо осі таким чином, що їх кут повороту, разом з показником гальмового механізму відповідає моменту навантаження M . Навантажувальний момент M встановлюється шляхом регулювання струму в котушках за допомогою автотрансформатора AT . При цьому, при збільшенні струму в котушках збільшується сила взаємодії сталевих диска з магнітним полем котушок, внаслідок чого збільшується кут повороту котушок з вантажем. Механічна енергія двигуна, при цьому, витрачається головним чином на нагрів сталевих диска.

Контрольні запитання

1. Які переваги та недоліки має асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в порівнянні з асинхронним двигуном з фазним ротором?
2. Яке призначення має автотрансформатор, що вмикається в коло гальмового механізму?
3. Чому при роботі двигуна без навантаження струм статора не дорівнює нулю?
4. Чому струм холостого ходу асинхронного двигуна відносно великий у порівнянні з струмом холостого ходу трансформатора?
5. Чому частота обертання ротора двигуна, що працює без навантаження, не дорівнює синхронній частоті?
6. Які види втрат мають місце в асинхронному двигуні?
7. Чому магнітні втрати в осерді ротора не враховують?
8. На які види втрат впливають величина повітряного зазору і товщина пластин сердечника статора?
9. Побудуйте енергетичну діаграму активної потужності асинхронного двигуна. Дайте характеристику її фізичному змісту.
10. Чому дорівнює ККД двигуна при холостому ході?
11. При якому навантаженні ККД двигуна максимальний? Чому?
12. Чому двигуни будують таким чином, що ККД має максимальне значення не при номінальному навантаженні?
13. Поясніть вид робочих характеристик асинхронного двигуна.
14. У яких межах змінюється ковзання, частота обертання вала двигуна та електромагнітний момент у генераторному режимі роботи асинхронної машини, у режимі двигуна, у режимі електромагнітного гальма?
15. Чому при малих навантаженнях двигуна його $\cos\phi_1$ має низьке значення?
16. Потужність, що підводиться до асинхронного двигуна, 19,3 кВт. Визначити ККД двигуна, якщо сумарні втрати складають 2300 Вт.
17. Знайти сумарну потужність втрат асинхронного двигуна АО2-62-2, що має ККД 90 % і потужність на валу 17 кВт.
18. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором МТ-42-8 споживає від мережі потужність 19,4 кВт при струмі 73,8 А та напрузі 220 В. Знайти ККД і $\cos\phi$, якщо потужність на валу двигуна 16 кВт.

19. Крановий трифазний шестиполосний асинхронний двигун з фазним ротором увімкнений у мережу змінного струму з напругою 380 В і переборює момент опору 70 Нм при ковзанні 53 %. Визначити коефіцієнт потужності, частоту обертання ротора, потужність на валу двигуна і ККД, якщо відомо, що потужність, що підводиться до двигуна, 7,5 кВт при лінійному струмі 12,5 А.

Список рекомендованої літератури

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 8.4 с. 205 –207).

2. Півняк Г.Г, Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навч. посібник – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 327 с. (§ 10.1 – 10.4. с. 136 – 145).

3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины: Учебник. – М. : Высш. шк., 1990. – 528 с. (§ 5.9. с. 197 – 201).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТ-2/4

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В РЕЖИМІ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи. Вивчити асинхронний пуск синхронного двигуна. Зняти експериментально характеристики синхронного двигуна при регулюванні струму збудження.

Програма роботи

1. Вивчення особливостей асинхронного пуску синхронного двигуна.
 1. Виконання асинхронного пуску синхронного двигуна.
 2. Дослідження U - подібних характеристик $I_1 = f(I_{3\phi})$ та $\cos \varphi = f(I_{3\phi})$ при $P_1 = const$.
 3. Складання звіту.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Вивчення особливостей асинхронного пуску синхронного двигуна

За допомогою методичних вказівок та рекомендованої літератури вивчити особливості асинхронного пуску синхронного двигуна.

Паспортні дані синхронного двигуна занести у табл. 4.1.

Номинальні дані трифазного синхронного двигуна. Робоче місце № _____

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$, в.о.

Етап 2. Виконання асинхронного пуску синхронного двигуна

Підібрати необхідну вимірювальну апаратуру і зібрати схему для асинхронного пуску синхронного двигуна згідно з рис. 4.1, яку потім представити для перевірки викладачу.

Пуск синхронного двигуна (СД) здійснюється без навантаження (вимикач B_4 повинен бути вимкнений). Послідовність пуску двигуна полягає у наступному:

2.1. Увімкнути вимикач B_6 . При цьому обмотка збудження синхронного двигуна (ОЗД) замкнена на активний опір $R = 12.5$ Ом, який у 8 – 10 разів перевищує опір обмотки збудження.

2.2. Увімкнути вимикач B_2 ("пуск"), що шунтує амперметри у колі обмотки статора (якоря) під час пуску.

2.3. На трансформаторах струму встановити шунтувальний елемент у центральний паз.

2.4. Увімкнути двигун у мережу за допомогою вимикача B_1 при номінальній напрузі мережі живлення.

2.5. Проконтролювати вольтметром наявність напруги збудника (повзун реостата $R_{\text{рег}}$ у колі обмотки збудження збудника (ОЗЗ) повинен бути встановлений на червоній рисці).

2.6. Якщо швидкість двигуна досягла сталого значення, вимкнути вимикач B_6 та увімкнути вимикач B_5 , при цьому обмотка збудження буде живитися від збудника.

2.7. Увімкнути у коло обмотки якоря амперметри:

- A_2 – при струмі якоря синхронного двигуна до 10 А – увімкнути вимикач B'_3 та вимкнути вимикач B_2 ;
- A_1 – при струмі якоря синхронного двигуна від 10 А до 30 А – увімкнути вимикач B_3 та вимкнути вимикач B_2 .

Етап 3. Дослідження U-подібних характеристик

Залежність струму якоря від струму збудження $I_1 = f(I_{36})$ знімати при незмінній напрузі обмотки якоря двигуна і при незмінному навантаженні на валу двигуна. Встановлювати такі значення навантаження:

$$P_1 = P_0; \quad P_1 = 0.3P_{\text{ном}}; \quad P_1 = 0.5P_{\text{ном}}.$$

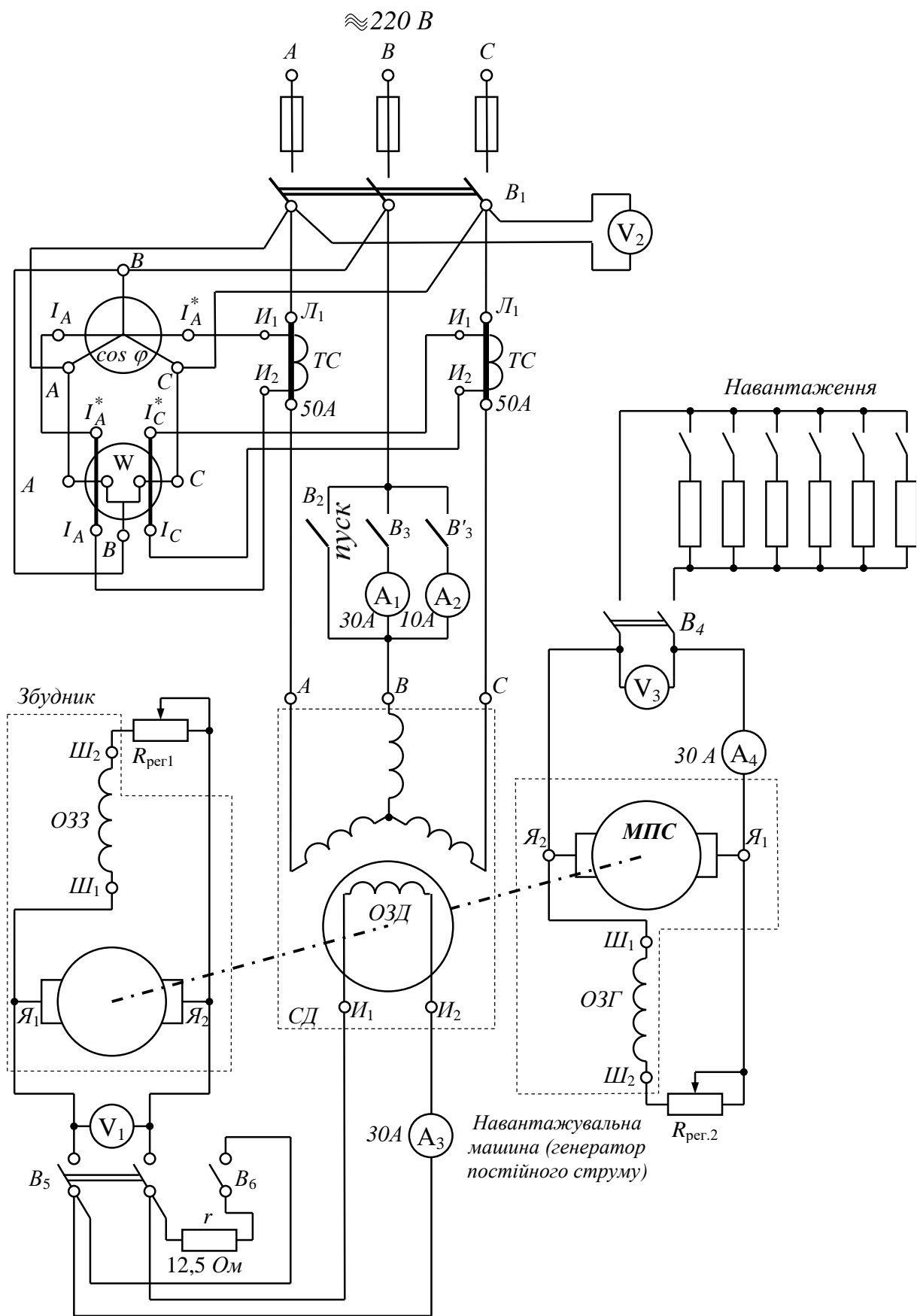


Рисунок 4.1. Схема асинхронного пуску синхронного двигуна та експериментальне дослідження його U -подібних характеристик

При неробочому ході синхронного двигуна ($P_1 = P_0$) встановити нормальний струм збудження ($I_{зб} = I_{зб.норм}$), що відповідає $\cos \varphi = 1$ або $I_1 = \min$. Значення $I_{зб.норм}$ та $P_1 = P_0$ занести в табл. 4.2 за показаннями ватметра W з урахуванням коефіцієнта трансформації $K_{тс}$ вимірювальних трансформаторів струму (лівий стовпчик).

3.1. Регулюючи опір $R_{рег}$ у колі обмотки збудження збудника можна змінювати значення коефіцієнту потужності двигуна. В цьому випадку змінюється струм збудження двигуна:

- при $I_{зб} < I_{зб.норм}$ – встановлюється режим недозбудження;
- при $I_{зб} > I_{зб.норм}$ – встановлюється режим перезбудження.

3.2. Для кожного з значень коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ у відповідності до табл. 4.2 визначити значення струму збудження $I_{зб}$ та струму якоря I_1 синхронного двигуна. Результати вимірювання струмів записати до таблиці 4.2.

3.3. При значеннях струму збудження двигуна, близьких до $I_{зб.норм}$, величину струму якоря I_1 знімати за допомогою амперметра A_2 з меншою межею вимірювання.

3.4. Після того, як закінчені виміри при неробочому ході, встановити нормальний струм збудження.

3.5. Увімкнути вимикач B_4 і встановити навантаження $P_1 = 0.3P_{ном}$, регулюючи величину навантажувального опору в колі генератора постійного струму. Точно встановити навантаження можна регулювальним реостатом у колі обмотки збудження генератора (ОЗГ). Установити нормальний струм збудження синхронного двигуна (при цьому струм якоря двигуна буде мінімальним $I_1 \rightarrow I_{1 \min}$). Занести значення $I_{зб.норм}$ та P_1 у табл. 4.2 (лівий стовпчик).

3.6. Зняти залежності $I_1 = f(I_{зб})$ та $\cos \varphi = f(I_{зб})$ при $P_1 = 0.3P_{ном}$ повторюючі дії згідно з п.п. 3.2...3.4. Щоб уникнути випадання із синхронізму, струм $I_{зб.min}$ повинен бути не менше $0.25I_{зб.норм}$.

3.7. Після того, як закінчені виміри, встановити нормальний струм збудження.

3.8. Встановити навантаження $P_1 = 0.5P_{ном}$, регулюючи величину навантажувального опору в колі генератора постійного струму. Точно встановити навантаження можна регулювальним реостатом у колі обмотки збудження генератора (ОЗГ). Установити нормальний струм збудження синхронного двигуна (при цьому струм якоря двигуна буде мінімальним $I_1 \rightarrow I_{1 \min}$). Занести значення $I_{зб.норм}$ та P_1 у табл. 4.2 (лівий стовпчик).

3.9. Зняти залежності $I_1 = f(I_{зб})$ та $\cos \varphi = f(I_{зб})$ при $P_1 = 0.5P_{ном}$ повторюючі дії згідно з п.п. 3.2...3.4. Щоб уникнути випадання із синхронізму, струм $I_{зб.min}$ повинен бути не менше $0.25I_{зб.норм}$.

3.10. Після того, як закінчення вимірювань, вимкнути двигун за мережі, вимкнувши вимикач B_1 .

Таблиця 4.2

U-подібні характеристики $I_1 = f(I_{3\phi})$ та $\cos \varphi = f(I_{3\phi})$ синхронного двигуна при $P_1 = const.$

Навантаження, струм якоря та нормальний струм збудження (при $\cos \varphi = 1$)	Режим недозбудження			Режим перезбудження		
	$I_{3\phi}, A$	I_1, A	$\cos \varphi$	$I_{3\phi}, A$	I_1, A	$\cos \varphi$
$P_1 = \text{_____ кВТ}$ $I_1 = \text{_____ А}$ $I_{зб.норм} = \text{_____ А}$			0.975			0.975
			0.95			0.95
			0.9			0.9
			0.85			0.85
			0.8			0.8
			0.75			0.75
			0.7			0.7
		0.6			0.6	
$P_1 = \text{_____ кВТ}$ $I_1 = \text{_____ А}$ $I_{зб.норм} = \text{_____ А}$			0.975			0.975
			0.95			0.95
			0.9			0.9
			0.85			0.85
			0.8			0.8
			0.75			0.75
			0.7			0.7
		0.6			0.6	
$P_1 = \text{_____ кВТ}$ $I_1 = \text{_____ А}$ $I_{зб.норм} = \text{_____ А}$			0.975			0.975
			0.95			0.95
			0.9			0.9
			0.85			0.85
			0.8			0.8
			0.75			0.75
			0.7			0.7
		0.6			0.6	

Етап 4. Складання звіту

Звіт з даної лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані трифазного синхронного двигуна (табл. 4.1).

3. Принципову схему асинхронного способу пуску синхронного двигуна (рис. 2.1) та дослідження його U -подібних характеристик.

4. Експериментальні дані (табл. 2.2) та U -подібні характеристики синхронного двигуна $I_1 = f(I_{3\phi})$ і $\cos \phi = f(I_{3\phi})$ при $P_1 = const$.

Методичні вказівки

До етапу 1

Існують такі способи пуску синхронного двигуна:

1. Пуск за допомогою розгінного двигуна, яким ротор синхронного двигуна попередньо приводиться в обертання до швидкості, близька до синхронної; потім машина збуджується і вмикається в мережу методом самосинхронізації як синхронний генератор;

2. Асинхронний пуск;

3. Частотний пуск, коли частота f плавно змінюється.

У лабораторній роботі потрібно здійснити асинхронний пуск, що є самим розповсюдженим способом пуску синхронних двигунів потужністю до 500 кВт.

Пуск двигунів великої потужності звичайно здійснюється при зниженій напрузі. Двигуни порівняно невеликої потужності пускаються прямим вмиканням у мережу.

Перед пуском обмотку збудження двигуна замикають на активний опір значення якого (8 - 10-разів більше в порівнянні з опором обмотки збудження). Її не можна замикати накоротко в початковий період пуску, інакше двигун при розгоні може застрягти на підсинхронній швидкості через явище "одноосьового ефекту". Обмотку збудження також не можна залишати розімкненою, тому що в ній при пуску виникає значна напруга, небезпечна для людини і для ізоляції обмотки. Момент обертання при пуску виникає від взаємодії обертового магнітного поля зі струмами, які індукуються в стрижнях короткозамкненої пускової обмотки, якою обладнана обмотка збудження. В міру зростання частоти обертання і зменшення ковзання ротора асинхронний момент двигуна зменшується (при синхронізмі він відсутній). Тому двигун не може під дією асинхронного моменту досягти синхронної швидкості. Втягування в синхронізм відбувається під дією реактивного моменту, обумовленого явнополюсною конструкцією ротора, та електромагнітного моменту, що виникає при вмиканні обмотки збудження в мережу джерела постійного струму.

До етапу 3

Залежність струму якоря від струму збудження $I_1 = f(I_{3\phi})$ при постійному навантаженні на валу і постійній напрузі представляє U - подібні криві, аналогічні таким само кривим синхронного генератора. У синхронному двигуні споживаний їм активний струм стає випереджувальним, відносно до напруги мережі при перезбудженні і відстаючим – при недозбудженні. При експлуатації рекомендується використовувати синхронний двигун у перезбудженому режимі, тому що в цьому випадку він є одночасно і генератором реактивної потужності, що

сприяє підвищенню коефіцієнта потужності мережі.

Навантаження двигуна в лабораторній роботі зручніше оцінювати за споживаною з мережі потужністю P_1 .

Як навантаження синхронного двигуна використовується з'єднана з ним муфтою машина постійного струму, що працює в режимі генератора.

Слід зазначити, що споживана двигуном потужність P_1 не залишається постійною, а змінюється при різних значеннях струму якоря внаслідок зміни втрат у двигуні.

Контрольні питання

1. Які застосовуються способи пуску синхронних двигунів?
2. У чому полягає перевага асинхронного пуску синхронного двигуна перед іншими способами пуску?
3. Поясніть особливості пуску синхронного двигуна за допомогою привідного двигуна; частотного способу пуску.
4. За рахунок чого відбувається втягування двигуна в синхронізм?
5. Як створюється навантаження синхронного двигуна в умовах лабораторії?
6. Як характеризуються струми якоря та обмотки збудження при перезбудженні і недозбудженні двигуна?
7. Чим відрізняється $\cos\phi$ двигуна в режимі перезбудження від режиму недозбудження?
8. В якому режимі збудження (недозбудженому, нормальному чи перезбудженому) рекомендується експлуатувати синхронний двигун і чому?
9. Які основні переваги і недоліки у синхронних двигунів перед іншими типами двигунів змінного струму?

Матеріали рекомендованої літератури

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 9.1, с. 218 – 222, § 9.5, с. 241 – 252).
2. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2003. – 327 с. (§ 18.3 стор. 235 – 236, § 18.6 стор. 238 – 240).
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. – М.: Высшая школа. 528 с. (§ 8.14 стор. 356 – 359).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2/5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

- Мета роботи:**
1. Зняти експериментально робочі характеристики синхронного генератора.
 2. Визначити 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 холостого ходу синхронного генератора.
3. Експериментальне зняття зовнішньої характеристики синхронного генератора.
4. Експериментальне зняття регулювальної 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; збирання 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. 5.1.

Таблиця 5.1

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. 5.1 (для підключення вольтметра і частотоміра необхідно виводи синхроколони A_G і B_G під'єднати до однойменних виводів синхронного генератора).

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 регулювального реостата $R_{рег3}$ в колі збудження, встановити номінальну частоту синхронного генератора, при якій швидкість обертання валу генератора дорівнює синхронній (частотомір, ввімкнений в обмотку статора генератора повинен показувати 50 Гц).

Етап 2. Експериментальне зняття характеристики холостого ходу синхронного генератора

Характеристика холостого 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 холостого ходу знімають при убутному струмі збудження $I_{зб}$, причому зміну струму збудження здійснюють плавно і тільки в одному напрямку.

Для зняття характеристики холостого ходу, регулюючи струм збудження генератора за допомогою реостатів $R_{рег1}$ і $R_{рег2}$, збільшити напругу генератора до $E_0 = (1.2 \div 1.3)U_n$.

Плавно зменшуючи струм збудження генератора, зняти 7-8 точок характеристики $E_0 = f(I_{зб})$, записуючи дані в табл. 5.2. Причому обов'язково зняти точку при $E_0 = U_{\dot{i}i}$, при цьому $I_{зб} = I_{зб.ном}$. Останню точку характеристики зняти при відключеному рубильнику P_2 , тобто при $I_{зб} = 0$ (для визначення величини напруги скористатися вольтметром V_2). При цьому напруга на затискачах обмотки якоря має місце за рахунок залишкового намагнічування генератора.

Таблиця 5.2.

*Характеристика холостого ходу синхронного генератора
 $E_0 = f(I_{зб})$ при $I = 0$, $n = n_{ном} = const$*

Дослід	$I_{зб}, A$								
	E_0, B								
Розрахунок	$I_{зб}^* = \frac{I_{зб}}{I_{зб.ном}}$								
	$E_0^* = \frac{E_0}{U_{ном}}$								

Етап 3. Експериментальне зняття зовнішньої характеристики синхронного генератора.

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

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

Ввімкнути рубильник P_1 і, поступово зменшуючи опір $R_{нав}$ (опускаючи ножі трифазного водяного реостата), збільшувати навантаження генератора. Зняти 7-8 точок залежності $U = f(I)$ при $\cos \phi = 1$, записуючи дані в табл. 5.3. Струм в обмотці збудження підтримувати незмінним ($I_{зб} = const$). Частоту струму якоря рівною 50 Гц підтримувати незмінною, регулюючи швидкість обертання приводного двигуна ($f = const = 50 Гц$).

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

Таблиця 5.3.

Зовнішня характеристика синхронного генератора
 $U = f(I)$ при $I_{зб} = const, \cos \phi = const, n = n_{ном}$.

Дослід	I, A								
	U, B								
Розрахунок	$I^* = \frac{I}{I_{ном}}$								
	$U^* = \frac{U}{U_{ном}}$								

Примітка: Після зняття характеристики плавно зменшити навантаження, підтримуючи частоту струму генератора 50 Гц.

Етап 4. Експериментальне зняття регулювальної характеристики синхронного генератора.

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

Для зняття регулювальної характеристики $I_{зб} = f(I_1)$ при $\cos \phi = 1$

регулюючи струм збудження реостатами $R_{рег1}$ і $R_{рег2}$, встановити номінальну напругу синхронного генератора, що працює в режимі холостого ходу. Записати в табл. 5.4 першу точку регульовальної характеристики при $I_1 = 0$.

Ввімкнути рубильник P_1 і, поступово зменшуючи опір $R_{нав}$ (опускаючи ножі трифазного водяного реостата), збільшувати навантаження генератора. Зняти 7-8 точок залежності $I_{зб} = f(I_1)$ при $\cos \phi = 1$, записуючи дані в табл. 5.4. Напругу на затисках генератора підтримувати незмінною ($U = U_{ном} = const$). Частоту струму якоря рівною 50 Гц підтримувати незмінною, регулюючи швидкість обертання приводного двигуна ($f = const = 50 Гц$).

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

Таблиця 5.4.

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

Дослід	I_1, A								
	$I_{зб}, A$								
Розрахунок	$I_1^* = \frac{I_1}{I_{ном}}$								
	$I_{зб}^* = \frac{I_{зб}}{I_{зб.ном}}$								

Примітка: 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 $U = 0, n = n_{ном}$.

Зупинити приводний двигун (натиснути на кнопку "Стоп" пускового апарату). Вимкнути всі вимикачі та зняти запобіжники. Виконати в схемі рис. 5.1 наступні зміни: обмотку якоря синхронного генератора замкнути накоротко у відповідності зі схемою рис. 5.2.

Після перевірки керівником правильності зборки схеми перевести повзунк 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 $I_K \approx I_{ном}$. 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 $U=0$, записуючи дані в таблицю 5.5 (струм короткого замикання повинен зменшуватися). Остання точка характеристики повинна бути знята при відключеному рубильнику P_2 .

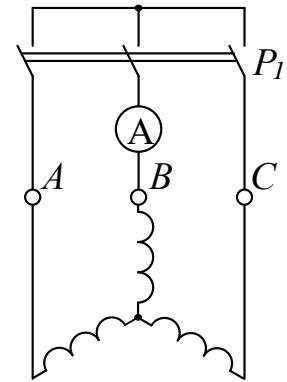


Рис. 5.2. Схема з'єднання обмоток синхронного генератора для досліду короткого замикання

Таблиця 5.5.

*Характеристика короткого трифазного замикання синхронного генератора
 $I_K = f(I_{зб})$ при $U = 0, n = n_{ном}$.*

Дослід	I_K, A					
	$I_{зб}, A$					
Розрахунок	$I_K^* = \frac{I_K}{I_{ном}}$					
	$I_{зб}^* = \frac{I_{зб}}{I_{зб.ном}}$					

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. 5.1).
4. Данні для побудови дослідної (табл. 5.2) та нормальної (табл. 5.6) характеристики холостого ходу та характеристика холостого ходу синхронного генератора у відносних одиницях.
5. Данні для побудови зовнішньої характеристики (табл. 5.3) та зовнішня характеристика синхронного генератора у відносних одиницях.
6. Данні для побудови регулювальної характеристики (табл. 5.4) та регулювальна характеристика синхронного генератора у відносних одиницях.
7. Данні для побудови характеристики трифазного короткого замикання (табл. 5.5) та характеристика трифазного короткого замикання синхронного генератора у відносних одиницях.
8. Визначення 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 5.2 – 5.5, необхідно побудувати у виді графіків, причому на осях повинні бути відкладені відносні одиниці. Базисними (одичними) величинами є:

- одиниця напруги – номінальна напруга U_1 ;
- одиниця струму – номінальний струм якоря $I_{ном}$;
- одиниця струму збудження – струм збудження, що відповідає номінальній напрузі при холостому ході $I_{зб.ном}$;

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

$$U^* = \frac{U}{U_H}; \quad I_1^* = \frac{I_1}{I_H}; \quad I_{зб}^* = \frac{I_{зб}}{I_{зб.ном}}.$$

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

До етапу 2

Характеристика холостого ходу будується в такий спосіб:

- а) за даними табл. 5.2 будується спадна вітка дослідної характеристики (крива 1) у відносних одиницях;
- б) дослідну характеристику зміщують паралельно самої собі по осі абсцис вправо на величину $\Delta I_{зб}$, отриману графічною екстраполяцією дослідної характеристики до перетинання з віссю абсцис, як показано на рис. 5.3, а.

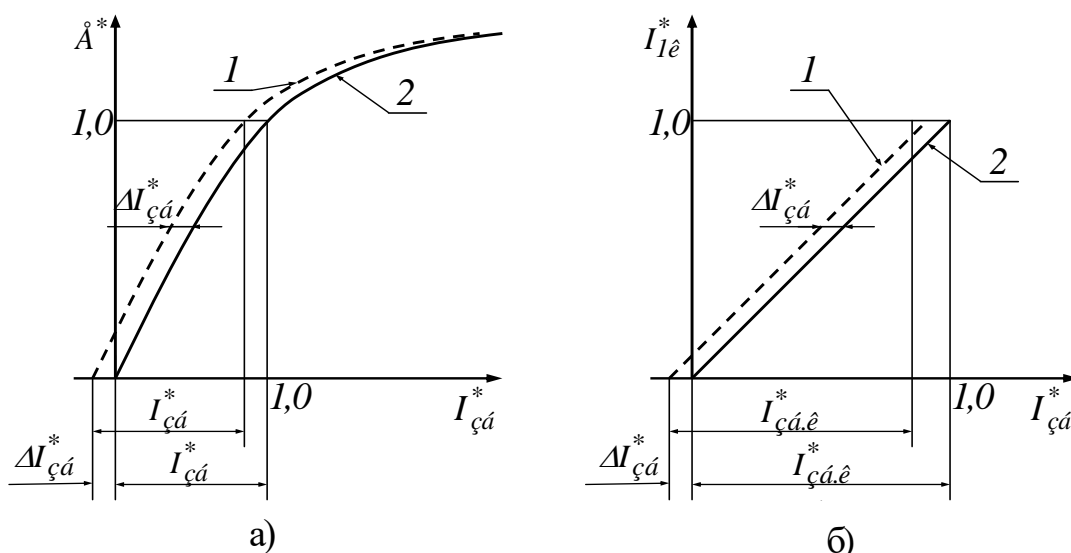


Рис. 5.3. Характеристики холостого ходу (а) та короткого замикання (б):
1 – дослідна характеристика; 2 – характеристика, яка приведена до початку координат

Характеристики холостого ходу сучасних синхронних машин, побудовані у відносних одиницях, так близькі одна до одної, що є можливість побудувати нормальну характеристику холостого ходу, яка приведена в табл. 5.6.

У звіті необхідно привести табл. 5.6 та порівняти отриману експериментальну характеристику холостого ходу синхронного генератора з нормальною характеристикою.

Таблиця 5.6.

Дані для побудови нормальної характеристики холостого ходу

$I_{z\delta}^* = \frac{I_{z\delta}}{I_{z\delta,ном}}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$E_0^* = \frac{E_0}{U_n}$	0	0.55	1.0	1.22	1.32	1.4

До етапу 5

Характеристика короткого замикання будується аналогічно попередній:

а) за даними табл. 5.5 будується дослідна характеристика трифазного короткого замикання у відносних одиницях (крива 1);

б) дослідну характеристику зміщують аналогічно характеристиці холостого ходу, як показано на рис. 5.3, б.

До етапу 6

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

$$BKЗ = \frac{I_{зб.0}}{I_{зб.к}} = \frac{1}{I_{зб.к}^*}$$

Контрольні запитання

1. Поясніть схему лабораторної установки, призначеної для дослідження трифазного синхронного генератора.
2. Поясніть конструкцію синхронного генератора
3. У чому складається перевага побудови робочих характеристик синхронного генератора у відносних одиницях?
4. Поясніть вид знятих експериментально робочих характеристик.
5. Що називається відношенням короткого замикання генератора, як воно розраховується?
6. Поясніть як знімається характеристика холостого ходу.
7. Поясніть як знімається зовнішня характеристика.
8. Поясніть як знімається регульовальна характеристика.
9. Який вигляд буде мати регульовальна характеристика при індуктивному навантаженні? При ємнісному навантаженні?
10. Який вигляд буде мати зовнішня характеристика при індуктивному навантаженні? При ємнісному навантаженні?
11. Чому характеристика короткого замикання синхронної машини має вид прямої лінії?
12. Що таке BKЗ і як впливає цей параметр на властивості синхронного генератора?
13. Яка кількість полюсів повинна бути в синхронному генераторі, що має частоту генерованого струму 500 Гц, якщо ротор обертається з частотою 1250 об/хв?
14. Число пар полюсів синхронного генератора 16. Визначити частоту обертання магнітного поля статора, якщо частота генерованого струму 50 Гц.
15. Число пар полюсів синхронного генератора 6. Визначити частоту обертання магнітного поля статора, якщо частота струму 50 Гц.

Література

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Циценков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 9.1, с. 218 –222, § 9.5, с. 241 –252).
2. Півняк Г.Г, Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2003. – 327 с. (§ 14.1 стор. 183 – 186; §§ 16.1 – 16.5 стор. 203 – 220).
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. – М.: Высшая школа. 528 с. (§§ 8.1 – 8.6 стор. 309 – 332).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2/6

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

- Мета роботи.**
1. Вивчити пристрій двигуна постійного струму, способи пуску, зміни напрямку обертання якоря і регулювання його частоти обертання.
 2. Одержати експериментальним шляхом дані для побудови швидкісної і регулювальної характеристик.

Програма роботи

4. Вивчення конструкції двигуна постійного струму.
5. Вивчення способів пуску, зміни напрямку обертання та регулювання частоти обертання двигуна постійного струму паралельного збудження.
6. Ознайомлення з експериментальною установкою, складання схеми, її випробування.
7. Експериментальне дослідження регулювальної характеристики двигуна.
8. Експериментальне дослідження електромеханічної (швидкісної) та робочих характеристик двигуна.
9. Складання звіту.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Вивчення конструкції двигуна постійного струму

- 1.1. Вивчити конструкцію двигуна постійного струму паралельного збудження.
- 1.2. Записати заводські дані досліджуваного двигуна, в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Номинальні дані двигуна постійного струму. Робоче місце № _____

Тип двигуна	$P_{\text{НОМ}}$ кВт	$U_{\text{НОМ}}$ В	$I_{\text{НОМ}}$ А	$I_{\text{ЗБ.НОМ}}$ А	$n_{\text{НОМ}}$ об/хв	$\eta_{\text{НОМ}}$ %

$I_{\text{ЗБ.НОМ}}$ – номінальне значення струму збудження двигуна (визначається при роботі двигуна у неробочому режимі за показаннями амперметра A_4 при повністю виведеному регулювальному реостаті $R_{\text{рег.2}}$).

Якщо значення ККД немає на щитку двигуна, то розрахувати його за виразом:

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%$$

Етап 2. Вивчення способів пуску, зміни напрямку обертання та регулювання частоти обертання двигуна постійного струму паралельного збудження

Використовуючи рекомендовану літературу та знання, набуті на лекційних заняттях, вивчити:

- способи пуску двигуна постійного струму паралельного збудження;
- способи зміни напрямку обертання валу двигуна (реверсу);
- способи регулювання частоти обертання валу двигуна.

Етап 3. Ознайомлення з експериментальною установкою, складання схеми та її експериментальне дослідження

3.1. Опис установки.

Експериментальне дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження виконують на стенді (рис. 6.1), що складається з двох машин постійного струму – двигуна D і навантажувального генератора G . У колі двигуна є пусковий апарат і регулювальний реостат $R_{\text{рег. 2}}$, а також прилади для вимірювання напруги (вольтметр V_2), струму якоря (амперметр A_3) і струму збудження (амперметр A_4). Частоту обертання валу визначають за тахометром TG .

У колі збудження навантажувального генератора є регулювальний реостат $R_{\text{рег. 1}}$, що дозволяє регулювати напругу на його затискачах, а у колі обмотки якоря – навантажувальний реостат $R_{\text{нав}}$. Потужність генератора визначають за показаннями приладів, що знаходяться в колі навантаження.

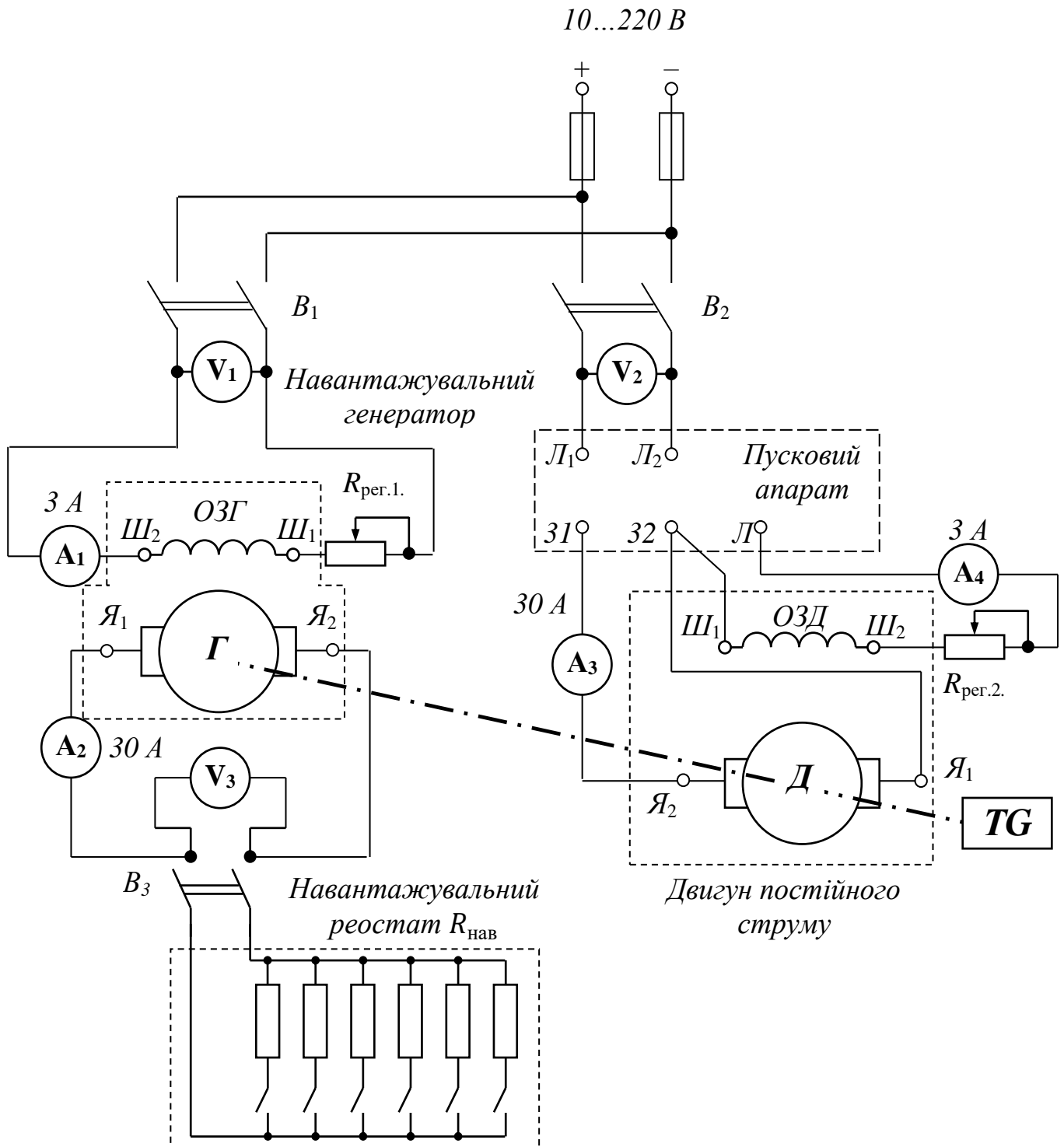
3.2. Складання схеми, пробний пуск двигуна.

Зібрати схему згідно з рис. 6.1. Вимкнути всі вимикачі. Регулювальний реостат у колі збудження двигуна встановити в положення нульової величини опору ($R_{\text{рег. 2}} = 0$). Після перевірки схеми керівником, увімкнути вимикач B_2 і натиснути кнопку "ПУСК" пускового апарата. Перевірити напрям обертання і правильність включення приладів у колі двигуна. Увімкнути вимикачі B_1 і B_3 і перевірити правильність включення приладів у колі генератора. У разі неправильного включення приладів, вимкнути всі вимикачі і після повної зупинки машин змінити полярність підключення приладів.

Етап 4. Експериментальне дослідження регулювальної характеристики двигуна

4.1. Регулювальна характеристика знімається при неробочому ході двигуна (вимикачі B_2 і B_3 вимкнуті).

4.2. Дані першої точки регулювальної характеристики $n_{н.х}$ зняти при максимальному струмі збудження двигуна, тобто $I_{зб} = I_{зб.мах}$, $R_{рег.2} = 0$. Потім, задаючи частоту обертання вала двигуна в межах від $n_{н.х}$ до 1500 об/хв та збільшуючи постійно опір регулювального реостата, зняти дані 6-7 точок регулювальної характеристики. Дані вимірювань записати в табл. 6.2.



Таблиця 6.2

Регульовальна характеристика двигуна постійного струму
 $n = f(I_{зб})$ при $I_a = 0, U = const = \text{---}V$

$I_{зб}, A$								
$I, об/хв$	$n_{н.х.} =$							1500

Після закінчення вимірювань регульовальний реостат $R_{рег. 2}$ встановити в нульове положення (струм в колі збудження двигуна – максимальний).

Етап 5. Експериментальне дослідження швидкісної та робочих характеристик двигуна

5.1. Дані першої точки швидкісної характеристики зняти при неробочому ході двигуна (вимикачі B_2 і B_3 вимкнено).

5.2. Увімкнути вимикачі B_2 і B_3 та при вимкнених секціях $R_{нав}$ за допомогою регульовального реостата $R_{рег. 1}$ на затискачах генератора встановити напругу 220 В.

Таблиця 6.3

Дані для побудови швидкісної характеристики двигуна постійного струму при $U_{дв} = const = \text{---}V$ та $I_{зб} = const = \text{---}A$

Точка	$I, об/хв$	I_a, A	Розрахункові величини			
			$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$M, Н \cdot м$	$\eta, \%$
1		$I_{a0} =$				
2						
3						
4						
5						
6						
7						

5.3. Замикаючи секції навантажувального реостата $R_{нав}$, збільшувати навантаження двигуна, при цьому струм якоря не повинен перевищувати $I_a = I_{аном}$. Упродовж усього дослідження підтримувати $I_{зб} = const$. Дані вимірювань частоти обертання та струму якоря занести в табл. 6.3.

Після закінчення вимірювань зняти навантаження (відключити всі секції навантажувального реостата $R_{нав}$), вимкнути всі вимикачі і після повної зупинки машин розібрати схему.

Етап 6. Складання звіту

Звіт з даної лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані двигуна постійного струму (заповнена табл. 6.1).
3. Схему установки для дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження (рис. 6.1).
4. Дані для побудови регульовальної характеристики (табл. 6.2).
5. Дані для побудови швидкісної та робочих характеристик (табл. 6.3).
6. Розрахунок опору якоря двигуна постійного струму та механічних втрат.
7. Графіки регульовальної характеристики $n = f(I_{36})$ – за табл. 6.2, швидкісної характеристики $n = f(I_a)$ – за табл. 6.3 та робочі характеристики двигуна: $n = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $I_a = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$ та $\eta = f(P_2)$ – за табл. 6.3.

Методичні вказівки

До етапу 1

Двигун постійного струму має таку ж будову, як і генератор постійного струму. Але на відміну від генераторів, двигуни постійного струму завжди збуджуються від мережі живлення. Залежно від способу приєднання кола збудження до кола якоря їх поділяють на двигуни незалежного, паралельного, послідовного і змішаного збудження з узгодженим або зустрічним вмиканням обмоток збудження. Прийнята система збудження визначає властивості двигуна.

До етапу 2

Для обмеження пускового струму в коло якоря вводять пусковий реостат $R_{п}$, який вибирають так, щоб пусковий струм у початковий момент пуску $I_n = (2 \dots 2,5)I_{ном}$. У цьому випадку

$$I_n = \frac{U}{R_a + R_n}.$$

Взаємодія струмів провідників якоря і магнітного поля двигуна викликає появу обертового моменту M , під впливом якого якор починає в обертатися:

$$M = C_m \Phi I_a.$$

Тут C_m – коефіцієнт, який залежить від конструктивних параметрів машини,

$$C_m = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a},$$

де p – число пар головних полюсів машини; N – число активних провідників якоря; a – число паралельних гілок обмотки якоря.

ЕРС, що виникає при розгоні якоря, частота обертання n якого постійно збільшується, призводить до зменшення струму якоря:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a + R_n} = \frac{U - C_e \Phi n}{R_a + R_n},$$

внаслідок чого обертальний момент двигуна знижується, час пуску збільшується. Для скорочення тривалості розгону якоря опір пускового реостата поступово зменшують і в кінці розгону зводять до нуля.

Робота двигуна з виведеним пусковим реостатом відбувається при струмі в колі якоря

$$I_a = \frac{U-E}{R_a} = \frac{U-C_e\Phi n}{R_a}.$$

Напрямок обертання якоря можна змінювати двома способами: зміною напрямку струму в обмотці збудження (змінити полярність напруги на затискачах Ш1 і Ш2) або в обмотці якоря (змінити полярність напруги на затискачах Я1 і Я2). Звичайно змінюють напрям струму в обмотці якоря.

Частота обертання якоря двигуна паралельного збудження визначається за формулою:

$$n = \frac{U-I_a R_{a.ц}}{C_e \Phi},$$

де U – напруга на затискачах кола якоря; Φ – магнітний потік одного головного полюса.

Я бачимо з формули, частоту обертання вала двигуна постійного струму можна регулювати такими способами:

- зміною напруги живлення (вниз від номінального значення) – частота обертання вала двигуна зменшується;
- зміною опору у колі якоря двигуна (введення додаткового реостата) – частота обертання вала двигуна зменшується;
- зміною магнітного потоку (введення додаткового опору в коло обмотки збудження, потік зменшується) – частота обертання вала двигуна збільшується.

Механічні характеристики двигуна і процеси, які в ньому відбуваються, при регулюванні частоти обертання вала двигуна детально розглянуті в літературі.

До етапу 4

Регульовальна характеристика двигуна – це залежність частоти обертання вала двигуна від струму збудження двигуна, при роботі його у режимі неробочого ходу та сталій напрузі:

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

Характеристика знімається шляхом зменшення струму збудження двигуна (за рахунок уведення в коло збудження додаткового опору).

Значення максимального струму збудження записати у графу $I_{зб.ном}$ (табл. 4.1).

До етапу 5

Електрична потужність, яку отримує двигун, $P_1 = UI$, де U – напруга на затискачах; I – струм зовнішнього кола, $I = I_a + I_{зб}$, I_a – струм у колі якоря, $I_{зб}$

– струм в обмотці збудження. Ця потужність витрачається на втрати при неробочому ході p_0 (механічні – $p_{\text{мех}}$ та магнітні втрати – $p_{\text{маг}}$, які у загальному випадку $p_{\text{іао}} = p_{\text{маг}} = \frac{p_0}{2}$) та електричні втрати p_e (електричні втрати у обмотці якоря, електричні втрати в обмотці збудження, електричні втрати в щітках та додаткові втрати), а решта потужності віддається навантаженню у вигляді механічної потужності через вал двигуна.

Розрахунок даних для побудови робочих характеристик:

- потужність, що споживається двигуном з мережі,

$$P_1 = U(I_a + I_{\text{зб.ном}}), \text{ Вт};$$

механічні втрати

$$p_{\text{мех}} = \frac{UI_{a0} - I_{a0}^2 R_a}{2}, \text{ Вт},$$

де U_0, I_{a0} – відповідно напруга та струм при роботі двигуна у режимі неробочого ходу, $R_a = 0,3 \dots 0,5 \text{ Ом}$;

- потужність на валу двигуна

$$P_2 = UI - (I - I_{\text{зб.ном}})^2 \cdot R_a - p_{\text{мех}}, \text{ Вт};$$

- момент на валу двигуна

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n}, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- ККД двигуна

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

За розрахованими та вимірними даними (табл. 6.3) побудувати електро-механічну характеристику $n = f(I_a)$ та робочі характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження: $n = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $I_a = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$ та $\eta = f(P_2)$ за умови $I_{\text{зб}} = I_{\text{зб.ном}} = \text{const}$ та $U = \text{const}$.

Контрольні питання

1. Які існують способи збудження двигунів постійного струму? Наведіть схеми вмикання.
2. Яку будову має двигун постійного струму паралельного збудження? Призначення та конструкція його головних елементів (якоря, ярма, колектора, головних та додаткових полюсів, обмоток якоря та збудження).
3. Призначення і початкове положення регулювального реостата в колі обмотки збудження під час пуску двигуна.
4. Для чого потрібен пусковий апарат і з яких міркувань вибирають його опір?
5. Якими способами можна змінювати напрям обертання якоря?
6. Яке призначення мають головні і додаткові полюси у двигуні?
7. Накреслити схему вмикання двигуна постійного струму паралельного збудження.

8. Як визначити ККД двигуна постійного струму?
9. Що називають регульовальною характеристикою двигуна, який вигляд вона має і за яких умов знімається?
10. Чому при зменшенні струму збудження збільшується частота обертання вала двигуна?
11. Що називають електромеханічною характеристикою двигуна, який вигляд вона має і за яких умов знімається?
12. Чому при збільшенні навантаження на валу зменшується частота обертання вала двигуна?
13. Як створюється навантаження на валу двигуна?
14. Що називають механічною характеристикою двигуна?
15. Що називають робочими характеристиками двигуна постійного струму? Поясніть їх вигляд.
16. Які існують способи регулювання частоти обертання вала двигуна постійного струму паралельного збудження? Наведіть механічні характеристики для кожного випадку.
17. Знайти пусковий струм двигуна паралельного збудження, якщо двигун працює при напрузі 110 В, опір кола якоря 2,5 Ом, струм в обмотці збудження 1 А.
18. Двигун паралельного збудження має такі паспортні дані: напруга 220 В, номінальний струм 10 А, струм збудження 2 А, опір якоря 1 Ом. Чому дорівнює ЕРС якоря?
19. Визначити напругу мережі постійного струму, якщо номінальний струм двигуна 10 А, ЕРС при номінальній частоті обертання 105 В, опір кола якоря 0,5 Ом
20. Потужність, споживана двигуном постійного струму з мережі, 1,5 кВт. Корисна потужність, що віддається двигуном в навантаження, 1,125 кВт. Визначити ККД двигуна

Література

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 10.1 – 10.4, 10.8, с. 254 – 267, § 10.8, с. 278 – 285).
2. Півняк Г.Г, Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2003. – 327 с. (§ 19.1–19.2, стор. 242-251; §§ 23.1 – 23.6 стор. 303 – 322).
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. – М.: Высшая школа. 528 с. (§§ 10.1–10.3 стор. 399 – 411).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТ-2/7

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

- Мета роботи.**
1. Вивчити будову двигуна постійного струму послідовного збудження, особливості експлуатації, способи пуску і регулювання частоти обертання якоря.
 2. Експериментальним шляхом одержати дані для побудови характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження.

Програма роботи

10. Ознайомлення з конструкцією, особливостями експлуатації, способами пуску і регулюванням частоти обертання якоря, а також заводськими даними двигуна постійного струму послідовного збудження.
11. Ознайомлення з установкою для випробування двигуна, складання схеми і розрахунок гальмівних моментів.
12. Дослідження двигуна послідовного збудження при схемі вмикання без шунтувальних елементів.
13. Дослідження двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки якоря.
14. Дослідження двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки збудження.
15. Обробка експериментальних даних.
16. Складання звіту.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Ознайомлення з будовою, особливостями експлуатації, способами пуску і регулюванням частоти обертання якоря, а також заводськими даними двигуна постійного струму послідовного збудження

- 1.1. Вивчити конструкцію двигуна постійного струму послідовного збудження, особливості його експлуатації, регулювання частоти обертання якоря двигуна.
- 1.2. Записати заводські дані випробувального двигуна в табл. 7.1.

ККД двигуна, якщо його значення немає на щитку двигуна, розрахувати за формулою

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%.$$

Момент на валу двигуна при номінальному режимі його роботи, Н·м:

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}},$$

де $P_{\text{НОМ}}$ – потужність на валу двигуна, кВт; $n_{\text{НОМ}}$ – частота обертання вала двигуна, об/хв.

Таблиця 7.1

Номинальні дані двигуна постійного струму. Робоче місце № _____

Тип двигуна	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$U_{\text{НОМ}}$, В	$I_{\text{НОМ}}$, А	$n_{\text{НОМ}}$, об/хв	Розраховано	
					$M_{\text{НОМ}}$, Н·м	$\eta_{\text{НОМ}}$, %

Етап 2. Ознайомлення з установкою для випробування двигуна, складання схеми і розрахунків гальмівних моментів

2.1. Експериментальне дослідження двигуна постійного струму послідовного збудження виконується на установці (рис. 7.1). У коло двигуна увімкнені вимірювальні прилади (амперметр A_2 вимірює струм якоря двигуна, амперметр A_3 – струм шунта якоря, A_4 – струм шунта обмотки збудження, вольтметр V_1 – напругу живлення), що дозволяють визначити всі електричні величини, які характеризують роботу двигуна, приєднаного до джерела постійної напруги через автоматичний двополюсний вимикач B_2 .

Шунтування обмотки якоря здійснюється вмиканням вимикача B_3 , а обмотки збудження – вимикача B_4 . На лабораторних місцях № 21 та 22 перемикач між режимами виконується за допомогою пакетного перемикача $П$.

Двигун запускається за допомогою пускового апарата.

Гальмівний момент створюють і визначають за допомогою електромагнітного гальма, обмотка якого отримує живлення від мережі постійної напруги через вимикач B_1 і регульовальний реостат $R_{\text{рег}}$. Струм в обмотці електромагнітного гальма визначається за допомогою амперметра A_1 . Частота обертання якоря вимірюється за допомогою електронного тахометра.

2.2. На основі паспортних даних розрахувати номінальний момент двигуна. Розрахувати гальмівні моменти (момент навантаження) та їх значення записати в табл. 7.2.

$$M_{\text{НАВ}} = (1,25; 1,0; 0,75; 0,5; 0,25) \cdot M_{\text{НОМ}}.$$

Таблиця 7.2

Моменти навантаження

Коефіцієнт навантаження $K_{\text{НАВ}} = \frac{M_{\text{НАВ}}}{M_{\text{НОМ}}}$	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25
Момент навантаження, Н·м					

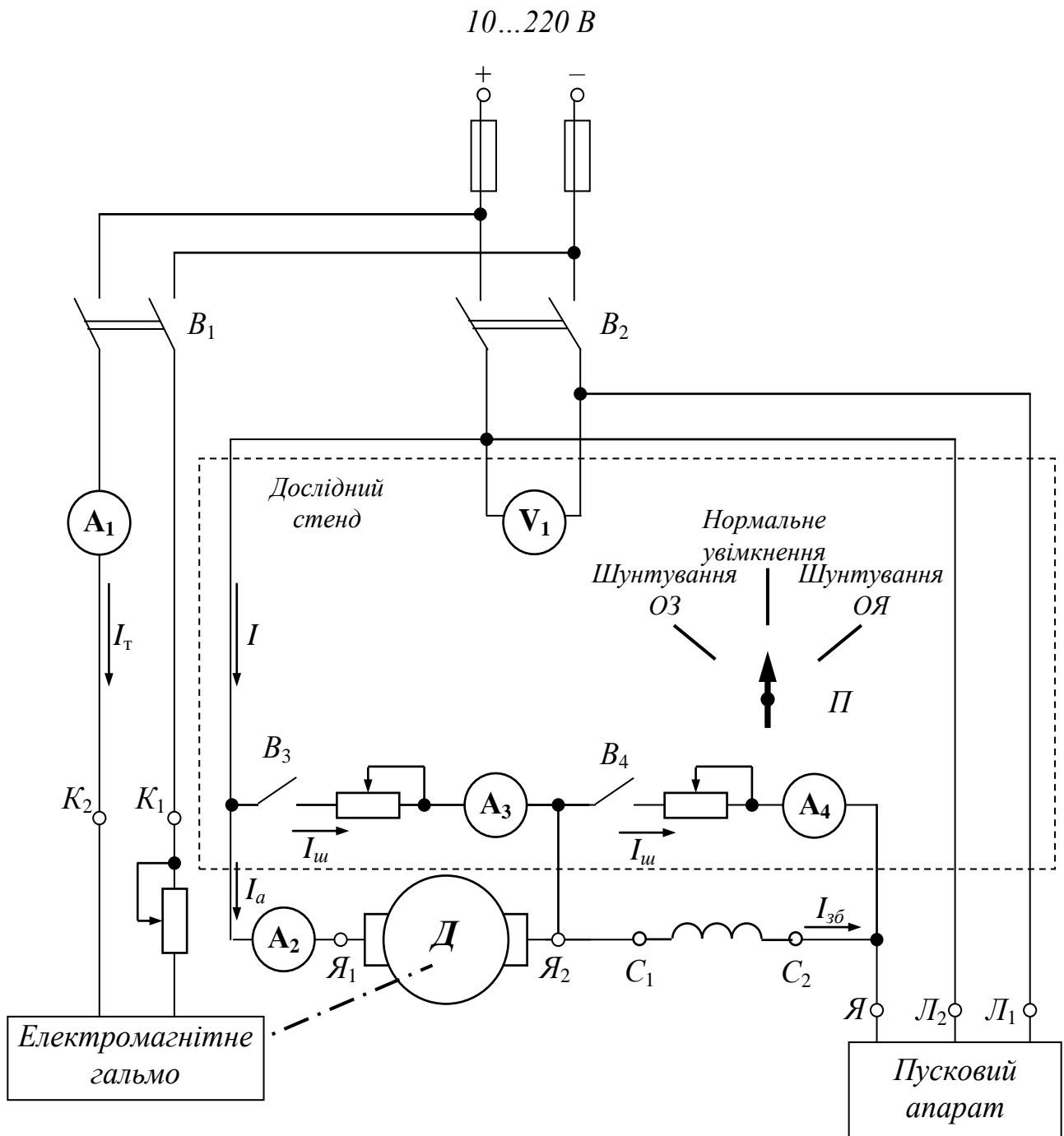


Рис. 7.1. Схема установки для дослідження двигуна постійного струму послідовного збудження

2.3. Зібрати схему установки (рис. 7.1). Усі вимикачі вимкнено. Рукоятку пускового апарата встановити в положення "СТОП". Після перевірки схеми викладачем увімкнути вимикач B_2 , за допомогою регульовального реостата R_{per} встановити струм I_T в обмотці електромагнітного гальма на рівні 0,3 А і провести пробний пуск двигуна (увімкнути вимикач B_1). Електронний тахометр увімкнути в мережу змінного струму та натиснути кнопку "ТАХ".

Етап 3. Дослідження двигуна послідовного збудження при схемі вмикання без шунтувальних елементів

Для увімкнення двигуна послідовного збудження, вимикачі B_3 та B_4 повинні бути вимкнені (або перемикач Π стояти у положенні "нормальне увімкнення").

Значення моменту навантаження з табл. 7.2 занести до табл. 7.3. Регулюючи струм електромагнітного гальма, установити значення моменту навантаження на шкалі гальма. Для кожного значення моменту навантаження виміряти напругу, струм якоря та частоту обертання. Отримані значення записати у табл. 7.3 – графа "Дослідження при нормальній схемі вмикання".

Таблиця 7.3

Результати дослідження двигуна послідовного збудження

Умови дослідження двигуна	№ досліду	Виміряні величини					Розраховані величини			
		\dot{I} , Н·м	U, В	n, об/хв	I_a , А	$I_{ш}$, А	$I_{\zeta a}$, А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η , %
Дослідження при нормальній схемі вмикання	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
Дослідження при шунтуванні обмотки якоря	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
Дослідження при шунтуванні обмотки збудження	1									
	2									
	3									
	4									
	5									

Етап 4. Дослідження двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки якоря

Для переходу у режим роботи двигуна з шунтуванням обмотки якоря, увімкнути вимикач B_3 (вимикач B_4 – розімкнений). Для лабораторних столів № 21 та 22 перемикач P перевести у положення "**ШУНТУВАННЯ ОЯ**".

Значення моменту навантаження з табл. 7.2 занести до табл. 7.3. Регулюючи струм електромагнітного гальма, встановити значення моменту навантаження на шкалі гальма. Для кожного значення моменту навантаження виміряти напругу, струм якоря, струм шунта та частоту обертання вала двигуна. Отримані значення занести у табл. 7.3 – графа "Дослідження при шунтуванні обмотки якоря".

Етап 5. Дослідження двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки збудження

Для переходу в режим роботи двигуна з шунтуванням обмотки якоря вимкнути вимикач B_3 та увімкнути вимикач B_4 . Для лабораторних столів № 21 та 22 перемикач P перевести у положення "**ШУНТУВАННЯ ОЗ**".

Значення моменту навантаження з табл. 7.2 занести до табл. 7.3. Регулюючи струм електромагнітного гальма, установити значення моменту навантаження на шкалі гальма. Для кожного значення моменту навантаження виміряти напругу, струм якоря, струм шунта та частоту обертання вала. Отримані значення записати у табл. 7.3 – графа "Дослідження при шунтуванні обмотки збудження".

Етап 6. Обробка експериментальних даних

За результатами дослідів для всіх схем увімкнення двигуна розрахувати величини струму в обмотці збудження $I_{зб}$, потужність, що споживається з мережі P_1 , потужність на валу двигуна P_2 та ККД двигуна η . Дані розрахунків занести до табл. 7.3.

За даними табл. 7.3 для різних схем увімкнення двигуна побудувати механічні $n = f(M)$, регульовальні $n = f(I_{зб})$, електромеханічні $n = f(I_a)$, моментні $M = f(I_a)$ характеристики та залежності $P_1 = f(M)$, $P_2 = f(M)$, $\eta = f(M)$. У кожній системі координат будується три характеристики (різним кольором для різних умов дослідження двигуна).

Етап 7. Складання звіту

Звіт з даної лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані двигуна постійного струму (заповнена табл. 7.1).

3. Схему установки для дослідження двигуна постійного струму послідовного збудження.
4. Дані розрахунку гальмівного моменту (табл. 7.2).
5. Дані досліду двигуна постійного струму з послідовним збудженням (табл. 7.3).
6. Графіки механічної $n = f(M)$, регулювальної $n = f(I_{зб})$, електромеханічної $n = f(I_a)$, моментної $M = f(I_a)$ характеристик та залежностей $P_1 = f(M)$, $P_2 = f(M)$, $\eta = f(M)$, за табл. 7.3.

Контрольні питання

1. Призначення пускового апарата?
2. Як змінити напрям обертання двигуна постійного струму послідовного збудження?
3. Чому механічна характеристика двигуна послідовного збудження має нелінійний характер?
4. Чому режим холостого ходу для двигуна послідовного збудження неприпустимий?
5. Як впливає шунтування обмотки якоря на механічну характеристику двигуна?
6. Як впливає шунтування обмотки збудження на механічну характеристику двигуна?
7. Як змінюється частота обертання двигуна при шунтуванні обмотки якоря і шунтуванні обмотки збудження двигуна?
8. Як впливає шунтування обмотки якоря і обмотки збудження двигуна на величину КПД двигуна при постійному навантаженні, на споживану з мережі потужність, на потужність на валу?
9. Як впливає шунтування обмотки якоря і обмотки збудження двигуна послідовного збудження на швидкісні характеристики?

Методичні вказівки

До етапу 1

У двигуні постійного струму послідовного збудження обмотка збудження увімкнена послідовно в коло якоря, тому магнітний потік Φ залежить від струму навантаження ($I = I_a = I_{зб}$).

Головною особливістю двигуна постійного струму послідовного збудження є істотна залежність частоти обертання якоря від навантаження на валу, тобто м'яка механічна характеристика при відносно невеликому навантаженні на валу двигуна (при $M < 0,7M_{ном}$). Це зумовило широке використання таких двигунів на електротранспорті, де потрібні плавні зміни частоти обертання вала. До недоліків двигунів постійного струму послідовного збудження необхідно віднести небезпеку надмірного зростання частоти обертання вала в режимі, близькому

до режиму холостого ходу двигуна. При шунтуванні якоря двигуна відповідним резистором така небезпека усувається.

До етапу 2

Механізм навантаження імітується електромагнітним гальмом, в якому момент навантаження M створюється за рахунок силової взаємодії сталевого диска, закріпленого на валу двигуна, з магнітним полем електричних котушок. Котушки закріплені разом з вантажем за можливості повороту під дією обертального моменту двигуна таким чином, щоб кут повороту рухомої частини механізму навантаження був пропорційний моменту навантаження M .

У процесі експериментальних досліджень не допускається режим холостого ходу двигуна через небезпеку надмірного зростання частоти обертання валу двигуна. Це пояснюється зворотною залежністю частоти обертання n від основного магнітного потоку Φ , створюваного обмоткою послідовного збудження згідно з формулою $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, де R_a – опір якорного кола двигуна; C_e – стала, що залежить від конструктивних параметрів двигуна; $\Phi = k I_{зб}$ – магнітний потік, який при $M < 0,7 M_{ном}$ практично прямо пропорційний струму I_a у колі якоря, і тому в режимі холостого ходу (при малих значеннях споживаного струму I_a) може бути близьким до нуля; k – коефіцієнт пропорційності при $M < 0,7 M_{ном}$.

До етапів 3 – 5

При невеликих навантаженнях $(0,8 \dots 0,9) I_{ном}$ (або $M < 0,7 M_{ном}$) магнітна система машини не насичена і магнітний потік прямо пропорційний струму якоря, тобто $\Phi = k I_{зб}$. У цьому випадку електромагнітний момент

$$M = C_m \Phi I_{зб} = C_m k I_a^2 = C'_m I_a^2 = 9,55 C'_e I_a^2.$$

Отже, характеристика $n = f(I_a)$ у початковій своїй частині є параболою. При великих навантаженнях виникає насичення магнітної системи двигуна, магнітний потік при зростанні навантаження практично не змінюється і характеристика двигуна має майже прямолінійний характер.

Електромеханічна характеристика двигуна

$$n = f(I_a) = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e k I_a} = \frac{U - I_a R_a}{C'_e I_a} = \frac{U}{C'_e I_a} - \frac{R_a}{C'_e}$$

у початковій своїй частині має гіперболічний вид, а при насиченні магнітної системи стає прямолінійною.

Струм обмотки збудження згідно зі схемою увімкнення двигуна визначається за першим законом Кирхгофа.

Струм, споживаний з мережі, визначається згідно зі схемою увімкнення двигуна:

для схеми нормального увімкнення і схеми шунтування обмотки збудження – це струм якоря, що визначається амперметром A_2 , тобто $I = I_a$;

для схеми шунтування обмотки якоря цей струм дорівнює такій величині
 $I = I_a + I_{ш}$.

Споживана з мережі потужність, Вт,

$$P_1 = UI.$$

Корисна потужність на валу, Вт, та ККД відповідно:

$$P_2 = \frac{Mn}{9,55}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

де M – момент на валу, Н·м; n – частота обертання вала, об/хв.

Література

1. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. /Ф.П. Шкрабець, Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2004. – 515 с. (§ 10.8, с. 278-385).
2. Півняк Г.Г, Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2003. – 327 с. (§ 19.1 – 19.2, стор. 242-251; § 23.1 – 23.6, стор. 303 – 322).
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машини. – М.: Высшая школа. 528 с. (§§ 10.10 – 10.12 стор. 456 –471).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТ-2/8

ВИПРОБУВАННЯ 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, зборка 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. Вивчити конструкцію генератора постійного струму, будову його елементів (статора, якоря, обмоток збудження, обмотки якоря, колектора, струмо знімального пристрою) і їх призначення.

1.2. Записати заводські дані генератора та двигуна в табл. 8.1.

Таблиця 8.1.

Номинальні 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	
Асинхронний двигун						
Тип двигуна	$P_{\text{ш.д.}}$ кВт	$U_{\text{ном.д.}}$ В	$I_{\text{ном.д.}}$ А	$n_{\text{ном.д.}}$ об/хв	$\eta_{\text{ном.д.}}$ %	$\cos \phi_{\text{ном.д.}}$

Етап 2. Ознайомлення з експериментальною установкою зборка схеми та її випробування

2.1. Експериментальне дослідження генератора постійного струму паралельного збудження виконують на установці (рис. 8.1), де приводною Машиною для генератора G є трифазний асинхронний двигун M з фазним ротором (Схема ввімкнення статора обирається у відповідності до живлючої напруги та номінальної напруги двигуна). Пуск асинхронного двигуна проводиться за допомогою пускового реостата. На початку пуску рукоятка пускового реостата розташовується в положенні "**ПУСК**", а після закінчення пуску реостат повинен бути повністю виведений і рукоятка розміститися в положенні "**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). Регульовальний 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 $R_{\text{нав}}$.

2.2. Зібрати схему згідно рис. 8.1, де G – випробовуваний генератор; III_1 , III_2 – виводи обмотки збудження генератора, M – приводний асинхронний двигун. Відключити всі вимикачі.

3.1. Встановити за допомогою реостата $R_{\text{рег}}$ струм збудження в обмотці збудження генератора постійного струму мінімальним і відключити вимикач B_2 . Зняти значення першої точки характеристики неробочого ходу і записати значення струму збудження $I_{36} = 0$ А і відповідне йому значення ЕРС, обумовлену залишковою намагніченістю головних полюсів, в таблицю 8.2.

3.2. Включити вимикач B_2 і переміщаючи ручку регулювального реостата $R_{\text{рег}}$ в одному напрямі (для збільшення струму збудження) довести напругу генератора до величини $1,2U_{\text{ном}}$, записуючи показання приладів – вольтметра і амперметра A_2 – в табл. 8.2 (графу – висхідна гілка). Зняти 6 точок.

3.3. Переміщаючи ручку регулювального реостата $R_{\text{рег}}$ у зворотному напрямі (для зменшення струму збудження), встановлювати різний струм збудження і записувати струм I_{36} і відповідну йому напругу в табл. 8.2 (графу – низхідна гілка). Останню точку зняти при відключеному вимикачі B_2 : $I_{36} = 0$ А, $U = E_{\text{зал}} = \dots$ В.

Таблиця 8.2.

Характеристика неробочого ходу генератора постійного струму

$$U = f(I_{36}) \text{ при } n = \text{const}, I_a = 0.$$

<i>Висхідна гілка характеристики неробочого ходу генератора</i>							
I_{36}, A	0						
U, B							
<i>Низхідна гілка характеристики неробочого ходу генератора</i>							
I_{36}, A							0
U, B							

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:

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

Зовнішню характеристику генератора знімати для збільшення навантаження генератора (опір навантаження зменшується, струм навантаження – зростає).

Ввімкнути вимикач B_2 та встановити напругу на затискачах генератора на рівні $U = 1,2U_{\text{ном}}$. Першу точку характеристики зняти при неробочому ході $U = 1,2U_{\text{ном}}, I = 0$ А. Надалі регулювальний реостат $R_{\text{рег}}$ не чіпати. Включити вимикач B_3 і поступово включаючи ступені навантажувального реостата збільшити струм навантаження (не більше номінального струму якоря генератора $I \leq$

$I_{aном}$). Зняти 5 – 6 точок характеристики. Дані вимірювань записати в таблицю 8.3.

Таблиця 8.3.

Зовнішня характеристика генератора постійного струму
 $U = f(I)$ при $n = const, R_{рег} = const$.

I, A	0						
U, B							

Після закінчення вимірювань поступово зняти навантаження та вимкнути вимикач B_3 .

Етап 5. Експериментальне дослідження регульовальної характеристики

Регульовальна характеристика це залежність струму збудження $I_{зб}$ від струму навантаження $I_{нав}$ при сталих значеннях частоти обертання і напруги генератора

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

Встановити напругу на затискачах генератора в режимі неробочого ходу (вимикач B_2 – ввімкнено, B_3 – вимкнено) на рівні $U = U_{ном}$. При струмі навантаження $I = 0A$ визначити струм збудження генератора.

Включити навантаження (включити вимикач B_3) і поступово включаючи ступені реостата навантаження збільшити струм (не більше номінального струму якоря генератора $I \leq I_{aном}$). При цьому за допомогою регульовального реостата $R_{рег}$ підтримувати напругу на затискачах генератора рівною номінальній. Зняти 5 – 6 точок характеристики. Дані вимірювань записати в таблицю 8.4.

Таблиця 8.4.

Регульовальна характеристика генератора постійного струму
 $I_{зб} = f(I)$ при $n = const, U = const = \underline{\hspace{1cm}} B$

I, A	0						
$I_{зб}, A$							

Після закінчення вимірювань поступово зняти навантаження, при цьому необхідно стежити, щоб напруга на затискачах генератора не перевищувала $U = 1,2U_{ном}$.

Після дослідження характеристик відключити всі вимикачі, зняти запобіжники і дочекавшись повної зупинки валу машини, розібрати схему.

Етап 6. Обробка даних

- а. За даними вимірювань (табл. 8.2, 8.3, 8.4) побудувати характеристику неробочого ходу, зовнішню $U = f(I)$ і регульовальну $I_{3\phi} = f(I)$ характеристики.
- б. Розрахувати значення номінального струму збудження, при якому в неробочому режимі напруга на затискачах генератора дорівнює номінальній (за характеристикою неробочого ходу).

Етап 7. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Номінальні дані генератора постійного струму (заповнена табл. 8.1).
3. Схему установки для дослідження генератора постійного струму (рис. 8.1).
4. Данні для побудови характеристики холостого ходу (табл. 8.2).
5. Данні для побудови зовнішньої характеристики (табл. 8.3).
6. Данні для побудови регульовальної характеристики (табл. 8.4).
7. Графіки характеристики холостого ходу $U = f(I_{3\phi})$ (за табл. 8.2), зовнішньої характеристики $U = f(I)$ (за табл. 8.3), регульовальної характеристики $I_{3\phi} = f(I)$ (за табл. 8.4).

Методичні вказівки

До етапу 1

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

Статор складається із станини, що є порожнистим циліндром, на внутрішній поверхні якого укріплено парне число головних полюсів. Головний полюс складається з сердечника полюса, що набирається з ізолюваних листів електротехнічної сталі, і полюсної котушки. Котушки полюсів сполучені так, щоб полярність полюсів чередувалася. Вони утворюють обмотку збудження. Якщо обмотка збудження живиться від стороннього джерела постійного струму генератор називають **генератором незалежного збудження**. Якщо обмотки збудження живляться від якоря цього ж генератора, він називається **генератором з самозбудженням**.

Якір складається з магнітопровода, що набирає з листів електротехнічної сталі, з пазами на зовнішній поверхні. В пази магнітопровода 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 . Послідовна обмотка збудження з малою кількістю витків з'єднується послідовно з колом якоря. Її виводи позначаються C_1 і C_2 . Генератори з обмоткою збудження першого типу називаються *генераторами паралельного збудження*, а з обмоткою збудження другого типу – *генераторами послідовного збудження*. *Генератори змішаного збудження* мають два 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 Д1 і Д2. Ці обмотки сполучають послідовно з колом якоря так, щоб створюване ними магнітне поле було направлено зустрічно по відношенню до магнітного поля якоря.

При обертанні якоря в нерухомому магнітному полі машини в обмотках якоря наводиться змінна ЕРС, яка за допомогою колектора і системи струмопровідних щіток перетвориться 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, N – число активних провідників якоря, a – число паралельних гілок обмотки якоря, Φ – магнітний потік одного головного полюса.

Для певного генератора формулу ЕРС можна записати так:

$$E = C_e n \Phi, \text{ де } C_e = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a}$$

є для даної машини деякою постійною величиною.

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

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

При обертанні якоря генератора в його обмотці потоком $\Phi_{\text{зал}}$ індукуються спочатку невелика ЕРС – $E_{\text{зал}}$. Ця ЕРС створює деякий струм $I_{\text{зб}}$ в обмотці збудження. По відношенню до $\Phi_{\text{зал}}$ він може бути направлений згідно або стрічно, тобто подмагнічувати або розмагнічувати машину. Для самозбудження необхідна погоджена дія обмотки збудження з потоком $\Phi_{\text{зал}}$, при цьому намагнічуюча сила обмотки збудження, підсилює магнітне поле машини, а останнє індукуює більшу ЕРС в обмотці якоря і т.д. При цьому процес самозбудження протікатиме до тих пір, поки падіння напруги в обмотці збудження $U_{\text{зб}} = I_{\text{зб}} R_{\text{зб}}$ не, порівняється з ЕРС генератора.

При збільшенні опору кола обмотки збудження напруга генератора зменшується. При деякому великому опорі кола збудження, що називається критичним, машина не збуджується.

З-за похибки вимірювання може мати місце розкидання точок експериментальних спостережень. Побудова характеристики шляхом з'єднання цих точок ломаною лінією є невірним.

На рис. 8.2. в якості прикладу показана побудова регулювальної характеристики генератора.

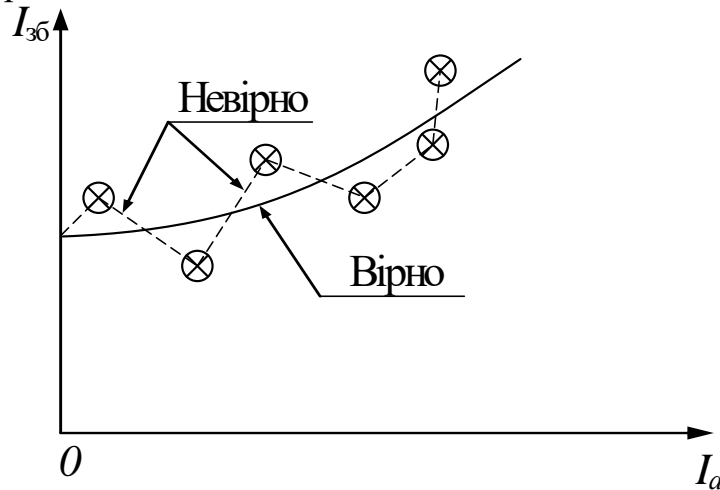


Рисунок 8.2 – Побудова регулювальної характеристики генератора

До етапу 3

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

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

При сталій частоті обертання величина ЕРС якоря генератора ($E = C_e \Phi n$) пропорційна магнітному потоку, тому характеристика неробочого ходу генератора є характеристикою намагнічення машини (рис. 8.3).

Середня лінія, проведена між висхідною та низхідною вітками є **розрахунковою характеристикою неробочого ходу**.

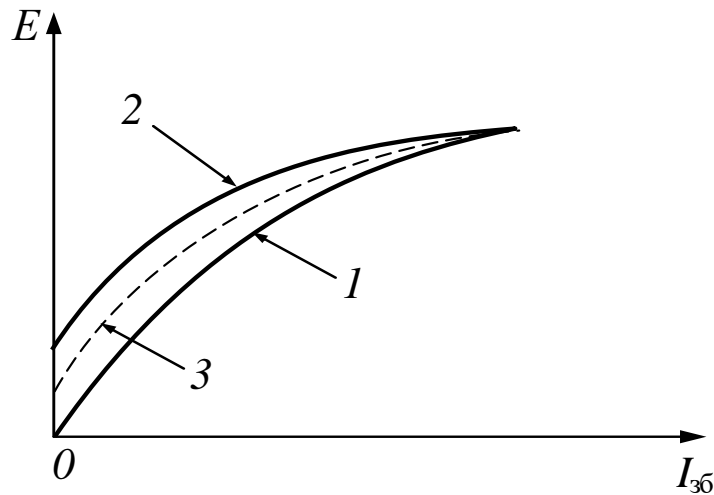


Рисунок 8.3 – Характеристика неробочого ходу генератора паралельного збудження:

1 – висхідна вітка, 2 – низхідна вітка, 3 – розрахункова характеристика неробочого ходу

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:

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

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

1. Падінням напруги в колі якоря $I_a R_a$.
2. Зменшенням магнітного потоку через розмагнічуючу дію поперечної реакції якоря.
3. Зменшенням струму збудження через зменшення напруги на затискачах обмотки збудження генератора

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

При поступовому зменшенні опорі зовнішнього кола струм навантаження збільшується тільки до деякого значення, що називається критичним струмом $I_{кр}$ (рис. 8.4). Цей струм звичайно не перевищує номінальний струм більш ніж у 2...2,5 рази. Подальше зменшення опорі навантаження виводить генератор із стійкого режиму роботи і генератор розмагнічується, напруга генератора знижується до нуля. Коли опір зовнішнього кола дорівнює нулю, що значить, що генератор замкнений накоротко (точка А).

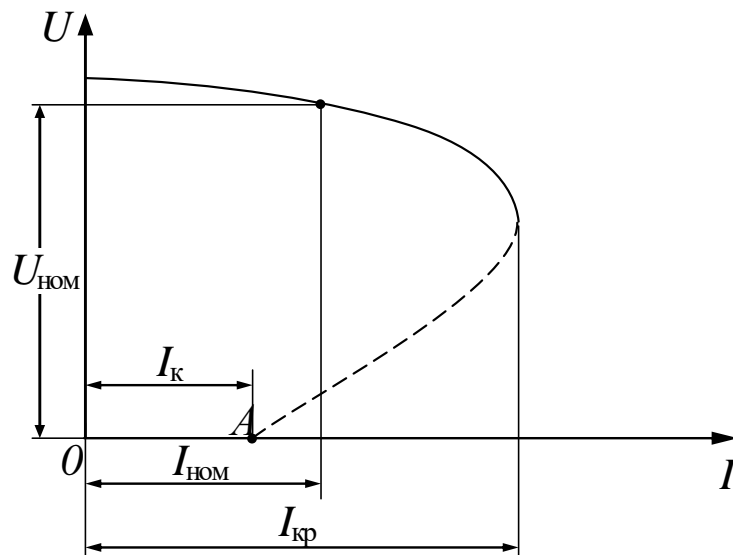


Рисунок 8.4 – Зовнішня характеристика генератора постійного струму

До етапу 5

Регулювальна характеристика (рис. 8.2) це залежність струму збудження $I_{зб}$ від струму навантаження $I_{нав}$ при сталих значеннях частоти обертання і напруги генератора

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

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 розмагнічуючу дію поперечної реакції якоря, яка збільшується із зростанням навантаження.

Контрольні запитання

1. Які існують способи збудження генераторів постійного струму? Наведіть схеми вмикання.
2. 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).
3. Яку найменшу та найбільшу кількість затискачів може мати генератор постійного струму? Як вони маркуються?
4. Від чого залежить ЕРС генератора постійного струму?
5. Умови самозбудження генератора постійного струму?
6. Як протікає процес самозбудження генератора постійного струму?
7. Чому не може наступити режим самозбудження генератора постійного струму?

8. Від чого залежить напруга на затискачах генератора постійного струму?
9. Що називається характеристикою неробочого ходу генератора і як її отримати?
10. Як побудувати розрахункову характеристику неробочого ходу генератора?
11. Що називається зовнішньою характеристикою генератора і як її отримати?
12. Які причини викликають зниження напруги на затискачах генератора при збільшенні навантаження?
13. Що називається регулювальною характеристикою генератора і як її отримати?
14. Визначити опір якоря, щоб ЕРС генератора змішаного збудження становила 240 В при струмі в колі якоря 90 А й опорі навантаження 2,0 Ом.
15. Знайти корисну потужність генератора змішаного збудження із струмом навантаження 60 А, якщо напруга на його затискачах 230 В.
16. Потужність генератора 18 кВт, втрати потужності в обмотці якоря 1,5 кВт. Чому дорівнює струм якоря, якщо ЕРС становить 243,7 В?

Список рекомендованої літератури

1. Шкрабець Ф.П., Ципленков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навчальний посібник – Д.: НГУ, 2005. – 515 с. (§§ 10.1 – 10.3; 107).
2. Півняк Г.Г, Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник – Д.: НГУ, 2003. – 327 с. (§§19.1 – 19.2; 22.1 – 22.4).
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с. (§§ 10.1 – 10.4; 10.8).

СПИСОК ДОДАТКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки: Навчальний посібник – Д.: Національний гірничий університет, 2005. – 515 с.
2. Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В. Збірник задач з електротехніки та основ електроніки. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 258 с.
3. Малинівський С.М. Загальна електротехніка: Підручник. – Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2003. 640 с.
4. Борисов Ю.М., Липатов Н.Д. Общая электротехника. – М.: Высшая школа, 1974. – 519 с.
5. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.
6. Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
7. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2002. – 469 с.

З М І С Т

ВСТУП	3
ПРАВИЛА БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЯХ КАФЕДРИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ	3
Лабораторна робота ЕТ-2/1 Вивчення конструкції трансформатора та приблизне визначення його номінальних величин	4
Лабораторна робота ЕТ-2/2 Дослідження конструкції та принципу дії трифазних асинхронних двигунів	10
Лабораторна робота ЕТ-2/3 Дослідження робочих властивостей асинхронного двигуна методом безпосереднього навантаження	18
Лабораторна робота ЕТ-2/4 Дослідження роботи синхронного двигуна в режимі регулювання струму збудження	23
Лабораторна робота ЕТ-2/5 Дослідження трифазного синхронного генератора	30
Лабораторна робота ЕТ-2/6 Дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження	39
Лабораторна робота ЕТ-2/7 Дослідження двигуна постійного струму послідовного збудження	47
Лабораторна робота ЕТ-2/8 Випробування генератора постійного струму паралельного збудження	54
СПИСОК ДОДАТКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ	65

Упорядники:

Ципленков Дмитро Володимирович
Бобров Олексій Володимирович
Федоров Сергій Іванович
Лябагова Тетяна Валеріївна

**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
до виконання лабораторних робіт з дисциплін
«Електротехніка», «Електротехніка та електроніка»
(розділ «Електричні машини»)
для студентів неелектротехнічних спеціальностей**

Редакційно-видавничий комплекс

Підписано до друку 31.08.21. Формат 30x42/4.
Папір Pollux. Ризографія. Умовн. друк. арк. 4,1.
Обліково-видавн. арк. 4,1. Тираж 100 прим. Зам. №

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпропетровськ, просп. Д. Яворницького, 19.