

В.І Нагул, В.С. Ткач, Е.Я. Блінкін

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
(розділ "Електричні машини")

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В.І. Нагул, В.С. Ткач, Е.Я.Блінкін

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
(розділ “ Електричні машини ”)

Затверджено Вченою радою Вінницького державного університету як лабораторний практикум для студентів напряму підготовки 0902– “Інженерна механіка”. Протокол № 5 від 26.12.2002 р.

Вінниця ВНТУ 2003

Рецензенти :

Б.С. Рогальский, д.т.н., професор

А.А. Видмиш, к.т.н., доцент

Д.І. Оболонський, к.т.н., начальник СОТ Південно-Західної електроенергетичної системи.

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького державного технічного університету Міністерство освіти та науки.

Т 48 В.І. Нагул, В.С. Ткач, Е.Я. Блінкін.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА(розділ “Електричні машини”).

Лабораторний практикум.- Вінниця : ВНТУ, 2003 - 57 с.

В посібнику розглянуті теми “Трансформатори”, “Асинхронні машини”, “Машини постійного струму” в лабораторних роботах та характерних практичних задачах. Лабораторний практикум розроблений у відповідності з планом кафедри та планами дисципліни “Електротехніка”

УДК 621.382

Електричні машини - найбільш поширений вид електричного обладнання.

Всі сучасні електричні машини і трансформатори, що випускають електромашинобудівні підприємства, підлягають двом видам випробувань: типовим і контрольним.

Типові випробування - це випробування машин, відібраних із серійних партій з метою перевірки всіх технічних вимог, запропонованих ДЕСТом до даного типу машин. Програма типових випробувань найбільш об'ємна і передбачає перевірку всіх властивостей і характеристик машини.

Контрольні випробування - випробування, яким підлягає кожна електрична машина, що випускається підприємством. Вони проводяться за спрощеною програмою: передбачають перевірку основних технічних вимог як безпосередньо, так і в порівнянні з результатами випробувань машин даного типу.

Початкові дослідження електричних машин і трансформаторів в лабораторії вузу насамперед повинні допомогти студентам оволодіти теоретичними розділами курсу.

В процесі лабораторних досліджень студенти більш детально знайомляться з конструкцією окремих вузлів різноманітних типів машин, стандартними позначеннями обмоток та позначеннями їх кінців, набувають навиків збирання схем, оволодівають технікою вимірювання електричних і неелектричних величин, методикою проведення досліджень і обробки їх результатів.

Після вивчення теорії і проведення лабораторних досліджень студент повинен мати уявлення про особливості конструкції даного типу машин, їх відмінних ознак, основних робочих, пускових і регульовальних властивостей та області їх застосування.

За обмеженням часу, відведеного на роботу в лабораторії, випробування електричних машин проводяться за скороченою програмою, яка повинна вмещувати перевірку найбільш важливих і характерних властивостей машини, що досліджуємо.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

В лабораторії досліджуються електричні машини та трансформатори, що працюють при напрузі 220 В, що вимагає від студентів суворого дотримання основних правил техніки безпеки.

1. Кожний студент виконує роботу в складі бригади, не менше двох чоловік. Одному виконувати роботи не дозволяється.

2. Складання і розбирання робочої схеми повинно виконуватись тільки при вимкненій напрузі. Живлення лабораторних стендів здійснюється від трифазної мережі з лінійною напругою 220 В. Ця мережа має заземлений

нульовий провід для отримання фазної напруги 127 В. Постійною напругою лабораторія живиться від тієї ж мережі через розподільний трансформатор і випрямляч.

3. Вимірювальні прилади та регулювальні пристрої в робочих схемах повинні відповідати номінальним величинам машин, що випробовуються.

Вмикання схеми під напругу після її складання чи будь-яких присланий в ній дозволяється тільки після перевірки викладачем!

Наявність напруги на робочій схемі сигналізується запаленням сигнальних ламп на лабораторному стенді.

Студентам ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:

- виконувати будь-які роботи на зворотній стороні лабораторних стендів;

- виконувати вмикання автоматичних вмикачів на головних розподільних щитах лабораторії;

- переносити прилади, апаратуру та з'єднувальні проводи з одного лабораторного стенда на інший;

- дотикатися до струмопровідних частин робочої установки, що знаходиться під напругою;

- дотикатися до оберտальних частин електричних машин;

- залишати без нагляду машину, що працює і схему, яка знаходиться під напругою;

- залишати на підлозі, на машинах, чи на столах невикористані проводи;

- з'єднувати проводи, що використовуються з метою збільшення їх довжини;

- виконувати роботи на машинах без кожухів, що закривають з'єднувальні муфти та інші виступаючі частини, що обертаються.

5. У випадку неполадок в машині чи схемі, що супроводжують швидкий перегрів машин, з'єднувальних проводів, реостатів, різке збільшення частоти обертаючої, студенти повинні негайно зняти напругу з робочої схеми, вимкнути автомат і повідомити про аварію викладачу.

6. Студенти допускаються до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з правилами. При порушенні правил техніки безпеки студенти не допускаються до роботи і тільки після повторного інструктажу допускаються з дозволу завідуючого кафедрою. При повторному порушенні правил студент не допускається до подальшої роботи в лабораторії.

ПРАВИЛА РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Всі заняття в лабораторії здійснюються під керівництвом викладача.

При виконанні лабораторних робіт студенти повинні дотримуватись таких правил.

1. Перед початком роботи в лабораторії всі студенти проходять інструктаж з техніки безпеки, про що робиться запис у відповідному журналі.

2. Лабораторні роботи виконуються у складі бригади, на чолі бригади призначається бригадир, який відповідає за дисципліну членів бригади і за виконання ними відповідних правил.

3. Роботи виконуються у відповідності з графіком. Для успішного виконання роботи кожний студент зобов'язаний попередньо ознайомитись з тими теоретичними розділами курсу, які відповідають даній роботі і виконати програму домашньої підготовки, приведені у відповідних вказівках.

4. На початку заняття викладач обітжує студентів про основні етапи роботи і методи проведення експериментів. Непідготовлені студенти до виконання лабораторної роботи не допускаються, після чого у відведений для заняття час вони опрацьовують всі розділи роботи, а виконують її в вільний від навчальних пар час, вказаний викладачем.

5. За виконану роботу кожний студент повинен скласти звіт, який виконують на стандартних аркушах паперу формату А4 з розмірами: 210x297 мм. Зліва повинні бути поля шириною 33 мм для підшивки. Текст записують чорнилами на одній стороні аркушу. Електричні схеми викреслюють олівцем з обов'язковим застосуванням інструментів для креслення. Графіки зображають на міліметровці кольоровими пастами чи олівцями. При цьому на кожній з осей координат повинні бути нанесені позначення величин, їх одиниці і масштаб. Для того, щоб у студентів залишалось правильне уявлення про вид характеристик, масштаби потрібно вибирати так, щоб початок координат відповідав нульовим значенням як незалежної, так і залежної змінних величин.

При кресленні характеристик спочатку потрібно нанести експериментальні точки, а потім провести плавну криву, розташовану як можна ближче до основної маси цих точок. Ця усереднена крива приймається за досліду характеристику.

6. Звіт містить:

- титульний лист з назвою кафедри, лабораторії, номером і темою роботи, прізвищем і групою автора звіту;
- програму виконання роботи;
- перелік електричних машин, трансформаторів, апаратури, що регулює пуск, вимірювальних приладів та їх паспортні дані;
- електричні схеми дослідів;
- таблиці з результатами вимірювань і розрахунків;
- розрахункові формули і приклад розрахунку для одного з режимів;

- висновки, в яких наводиться коротка характеристика досліджуваних машин, її основні відмінні особливості, головні результати експериментів.

7. На кожному наступному занятті оформлені звіти здають на перевірку. Правильно виконані звіти підписує викладач. Потім кожний студент індивідуально захищає роботу. Звіти захищених робіт залишаються в лабораторії. Студенти, які захистили всі роботи, отримують залік з лабораторного практикуму.

Приступаючи до виконання лабораторного практикуму з розділу "Електричні машини", студенти повинні володіти певними знаннями з математики, фізики і розділу "Електричні кола".

Знати закон електромагнітної індукції, закон Ома, закони Кірхгофа, закон повного струму для розрахунку магнітного кола, правило правої руки для визначення напрямку збудженої ЕРС, правило лівої руки для визначення напрямку дії сили.

Розуміти, що в колі з послідовним з'єднанням елементів напруга розподіляється пропорційно їх опорам, а в колі з паралельним з'єднанням струми розподіляються обернено пропорційно опорам; розуміти явище взаємної індукції, фізичний зміст активної, реактивної і повної потужності змінного струму, коефіцієнта потужності.

Вміти розв'язувати диференціальні рівняння, обчислювати активну, реактивну й повну потужності однофазних і трифазних кіл синусоїдального струму, будувати на комплексній площині векторні діаграми для електричного стану кіл синусоїдального струму; включати електровимірвальні прилади (вольтметр, амперметр, ватметр).

Після виконання лабораторного практикуму з електричних машин студенти повинні:

- знати будову, принцип дії і сферу застосування основних електричних машин постійного струму, асинхронних і синхронних, можливості їх використання в електроприводах; механічні й робочі характеристики електричних машин, засоби пуску і регулювання їх частоти обертання;

- розуміти характер процесів, що протікають в електричних машинах, від механічних і робочих характеристик; переваги і недоліки різноманітних електричних машин; особливості роботи електричних машин в режимі двигуна та генератора;

- вміти вибирати електричні двигуни до конкретного робочого механізму відповідно до вимог технологічного процесу; запускати двигун в хід і регулювати його швидкість обертання; проводити випробування електричних машин, отримувати їх основні характеристики; вимірювати електричні і неелектричні величини.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

МЕТА РОБОТИ: вивчити будову трансформатора; дослідним шляхом визначити параметри холостого ходу й КЗ; розрахувати опір схеми заміщення трансформатора й побудувати основні характеристики трансформатора в функції навантаження.

11.1 Програма роботи

11.1.1. Ознайомитися з приладами, апаратами і обладнанням експериментальної установки, записати їх технічні характеристики в протокол випробувань.

11.1.2. За паспортними даними трансформатора визначити номінальний струм первинної і вторинної обмоток; підібрати відповідні вимірювальні прилади.

11.1.3. Скласти схему експериментальної установки для дослідження однофазного трансформатора. Ручку автотрансформатора встановити в нульове положення, вимикач В1 встановити в положення "вимкнено".

11.1.4. Виконати дослід холостого ходу трансформатора. Результати вимірювань занести в таблицю 11.1.

Таблиця 11.1

| № п/п | Результати вимірювань | | | | Результати обчислень | | | |
|-------|-----------------------|----------|--------|--------------------|------------------------------|-----------|-----------|-------|
| | Напруга | | Струм | Активна потужність | Параметри гілки намагнічення | | | |
| | $U_1, В$ | $U_2, В$ | $I, А$ | $P_1, Вт$ | $R_0, Ом$ | $X_0, Ом$ | $Z_0, Ом$ | K_T |
| | | | | | | | | |

11.1.5. Виконати дослід навантаження трансформатора. Результати досліджень занести в таблицю 11.2.

Таблиця 11.2

| № п/п | Результати вимірювань | | | | | Результати обчислень | | | |
|-------|------------------------|----------|-----------|----------|----------|----------------------|-----------|--------|--------------|
| | $U_1, В \text{ const}$ | $I_1, А$ | $P_1, Вт$ | $U_2, В$ | $I_2, А$ | β | $P_2, Вт$ | η | $\cos\phi_1$ |
| 1...6 | | | | | | | | | |

11.1.6. Виконати дослід КЗ. Результати досліджень занести в таблицю 11.3.

Таблиця 11.3

| № п/п | Виміряно | | | | | Розраховано | | | | |
|-------|-------------|-------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | $U_{1к}, В$ | $I_1 = I_{1н}, А$ | $P_k, Вт$ | $Z_{кк}, Ом$ | $R_k, Ом$ | $X_{кк}, Ом$ | $R_1, Ом$ | $X_1, Ом$ | $R_2, Ом$ | $X_2, Ом$ |
| | | | | | | | | | | |

11.1.7. За даними дослідю холостого ходу обчислити параметри ланки намагнічення схеми заміщення трансформатора R_0 , X_0 , Z_0 і коефіцієнт трансформації K_T .

11.1.8. За даними дослідю КЗ визначити параметри обмоток трансформатора R_1 , X_1 , R_2 , X_2 .

11.1.9. Розрахувати і побудувати в загальній системі координат робочі характеристики трансформатора U_2 , I_2 ; $\cos\phi_1$, $\eta=f(\beta)$.

11.1.10. Накреслити схему заміщення трансформатора і визначити значення всіх її параметрів.

11.1.11. Зробити висновки за результатами виконаної роботи.

11.2 Програма домашньої підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Повторити за підручником [1] теоретичний матеріал: будову і принципи дії трансформатора, рівняння електричного та магнітного стану, дослідю холостого ходу і КЗ, схему заміщення трансформатора, робочі характеристики.

2. Підготувати протокол випробувань із схемами лабораторних установок і таблицями для занесення результатів дослідів.

3. Відповісти на контрольні запитання до лабораторної роботи.

11.3 Основні теоретичні відомості

Трансформатором називається електромагнітний апарат, який призначений для перетворення електричної енергії в ланцюгах змінного струму з одним співвідношенням напруги й струму в електричну енергію з іншим співвідношенням напруги й струму при незмінній частоті.

Вивчення роботи трансформатора під навантаженням полягає в дослідженні двох граничних режимів його роботи: холостого ходу і КЗ.

Під холостим ходом (х.х.) розуміють такий режим роботи трансформатора, при якому до первинної обмотки підводиться номінальна напруга, а вторинна обмотка розімкнена чи замкнена через вольтметр з великим внутрішнім опором. Із дослідю х.х. можна визначити:

а) коефіцієнт трансформації трансформатора K , який приблизно дорівнює відношенню напруг на затискачах первинної U_1 і вторинної U_2 обмоток;

$$K \approx \frac{U_1}{U_2}$$

б) втрати в магнітопроводі (втрати в сталі) трансформатора $P_{ст}$, які дорівнюють активній потужності, яка споживається в режимі х.х. P_x ;

в) значення активного R_0 і реактивного X_0 опорів схеми заміщення (опори R_0 і X_0 вводять в схему заміщення, щоб врахувати процеси в магнітопроводах трансформатора).

Під КЗ розуміють такий режим, при якому вторинна обмотка замкнена накоротко, а до первинної обмотки підводиться понижена проти номінальної напруга, яка називається напругою КЗ U_k . Ця напруги складас декілька відсотків від номінальної $U_{1н}$ ($U_k=5,5-10,5\%U_{1н}$). При подачі на затискачі первинної обмотки напруги U_k в досліді КЗ в ланцюгах первинної і вторинної обмоток діють номінальні значення струмів $I_{1н}$ і $I_{2н}$.

Дослід КЗ дає можливість визначити:

а) втрати в обмотках (електричні) $P_{ес}$, які дорівнюють активній потужності, що споживається трансформатором в досліді КЗ P_k ;

б) значення активних опорів R_1, R_2 , а також реактивних опорів розсіювання X_1 і X_2 відповідно до первинної і вторинної обмоток трансформатора.

Будь-який навантажувальний режим можна розглядати як проміжний між двома граничними режимами рботи трансформатора. В режимі навантаження підведена до первинної обмотки трансформатора напруга U_1 врівноважується ЕРС первинної обмотки E_1 і спадом напруги на повному опорі цієї обмотки z_1 :

$$U_1 = -E_1 + z_1 I_1$$

де I_1 - комплекс струму в первинній обмотці.

У вторинній обмотці трансформатора збуджується ЕРС E_2 . Якщо до вторинної обмотки, повний опір якої z_2 , приєднати навантаження, то у вторинній обмотці потече струм I_2 і на затискачах встановиться напруга

$$U_2 = E_2 - z_2 I_2$$

значення якої залежить від характеру навантаження і може бути визначено із зовнішніх характеристик трансформатора (рис. 11.1).

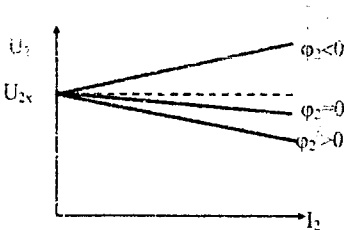


Рисунок 11.1

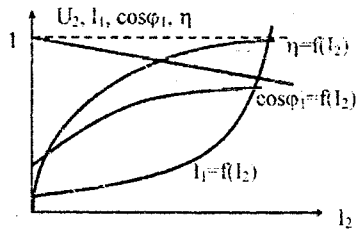


Рисунок 11.2

Зовнішні характеристики отримують при $U_1 = \text{const}$, $i_1 = \text{const}$ і $\cos\phi_2 = \text{const}$. де $\cos\phi_2$ - коефіцієнт потужності навантаження. Відсоткова зміна вторинної напруги ΔU_2 показує, наскільки напруга на затискачах

вторинної обмотки при навантаженні U_2 відрізняється від цієї напруги при х.х.:

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2X} - U_2}{U_{2X}}$$

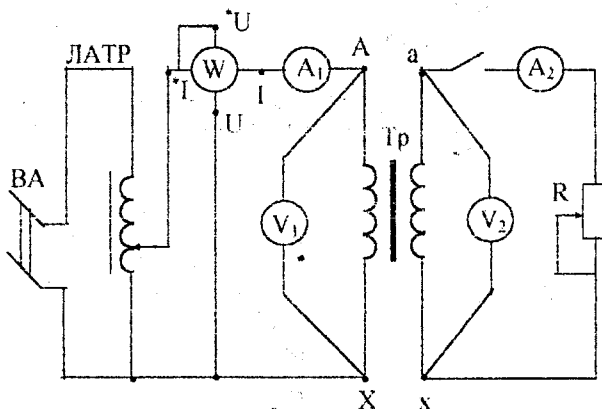
Робочими характеристиками трансформатора називають залежності вторинної напруги U_2 , первинного струму I_1 , ККД η , коефіцієнта потужності $\cos\phi_2$ від вторинного струму I_2 при незмінній напрузі живлення U_1 , частоті f_1 і коефіцієнті потужності навантаження $\cos\phi_2$. Наближений вигляд цих характеристик подано на рис. 11.2.

11.4 Опис лабораторного стенда

Експериментальні дослідження однофазного трансформатора виконують на лабораторному стенді, принципова схема якого зображена на рис. 11.3.

Живлення первинної обмотки АХ дослідного трансформатора T_p здійснюється через лабораторний трансформатор ЛАТР і автоматичний вимикач ВА. Для вимірювання первинного струму I_1 , первинної напруги U_1 і потужності P_1 , яка підводиться, в коло первинної обмотки увімкнені вимірювальні прилади: амперметр A_1 , вольтметр V_1 та ватметр W.

До вторинної обмотки ах трансформатора підключений резистор R, який дозволяє змінювати струм навантаження. Значення вторинного струму I_2 і напруги U_2 вимірюють амперметром A_2 і вольтметром V_2 . Вимикач B_1 забезпечує розмикання кола навантаження в досліді х.х.



Рисунк. 11.3

11.5 Порядок виконання лабораторної роботи

11.5.1. В досліді х.х. автотрансформатором ЛАТР на затискачах первинної обмотки встановлюють номінальну напругу. Вимикач ВА повинен бути розімкненим (рис. 11.3).

Вхідний опір трансформатора при досліді х.х.:

$$Z_{вх} = \frac{U_{1X}}{I_{1X}} = Z_0$$

практично дорівнює повному опору Z_0 ланки намагнічення, оскільки опори R_0 і X_0 в сотні разів перевищують активний R_1 і реактивний опір розсіяння X_1 первинної обмотки трансформатора. З урахуванням цього, опори R_0 і X_0 знаходять так:

$$R_0 = \frac{P_{1X}}{I_{1X}^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

Коефіцієнт трансформації:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_{1X}}{U_{2X}}$$

11.5.2 Для здійснення досліді навантаження вмикають вимикач ВА змінюючи за допомогою реостата R навантаження трансформатора, повільно збільшують струм I_2 до номінального. Робочі характеристики розраховують за такими формулами:

коефіцієнт навантаження: $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$;

потужність навантаження: $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi = U_2 I_2$;

Оскільки навантаження чисто активне, то $\varphi_2 = 0$;

коефіцієнт потужності $\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$

коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

11.5.3 В досліді КЗ до первинної обмотки трансформатора підводять знижену напругу, яка складає кілька відсотків від номінальної, а вторинну обмотку замикають накоротко проволком (рис.11.4). Ручка

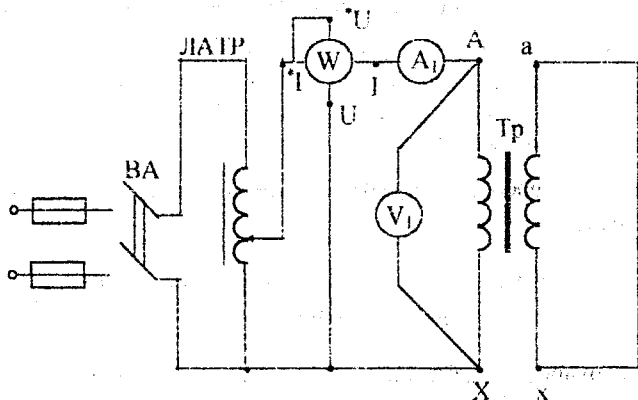


Рисунок. 11.4.

автотрансформатора ЛАТР перед вмиканням установки обов'язково повинна бути виведена на нуль. Потім напругу, що підводиться до первинної обмотки, плавно збільшують доги, поки струм не стане рівний номінальному. Покази приладів, що відповідають значенню струму КЗ $I_{1к}=I_{1ном}$ заносять в таблицю 11.4.

Таблиця 11.4

| № п/п | Виміряно | | | | | Розраховано | | | | |
|----------|---------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | $U_{1к}$ В | $I_1=I_{1ном}$ А | $P_{кз}$ Вт | $Z_{кз}$ Ом | $R_{гс}$ Ом | $X_{кз}$ Ом | R_1 Ом | X_1 Ом | R_2 Ом | X_2 Ом |
| | | | | | | | | | | |

Розрахункові величини обчислюють за такими формулами:
напруга КЗ у відсотках від номінальної первинної напруги:

$$U_{кз}\% = \frac{U_{кз}}{U_{1н}} \cdot 100\%$$

повний опір КЗ трансформатора $Z_{кз} = \frac{U_{кз}}{I_{кз}}$ де $I_{кз} = I_{1н}$.

активна $R_{кз}$ та реактивна $X_{кз}$ складові опору КЗ

$$R_{кз} = \frac{P_{кз}}{I_{кз}^2}; \quad X_{кз} = \sqrt{Z_{кз}^2 - R_{кз}^2}$$

опори первинної обмотки і зведені опори вторинної обмотки

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{кз}}{2}, \quad X_1 = X_2' = \frac{X_{кз}}{2}$$

опори вторинної обмотки $R_2 = \frac{R_2'}{K_T^2}, \quad X_2 = \frac{X_2'}{K_T^2}$.

11.6 Завдання на підготовку до лабораторно-практичного завдання

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно:

1) ознайомитись з теоретичними відомостями, які приведені в дійсних методичних вказівках і в [1.с 295-332;2.с.2.238-266];

2) розв'язати за вказівкою викладача;

3) підготувати в робочому зошиті протокол лабораторних дослідів однофазного трансформатора.

11.7. Питання для самоконтролю і задачі для самостійного розв'язування

1. Зобразіть будову однофазного трансформатора. Основні елементи конструкції і їх призначення.

2. Поясніть принцип дії трансформатора в режимі холостого ходу.

3. Напишіть рівняння електричного стану первинної обмотки з миттєвими і комплексними значеннями величин. Поясніть їх.
4. Побудуйте векторну діаграму трансформатора в режимі холостого ходу, покажіть на ній вектор напруги на опорі розсіювання первинної обмотки.
5. Визначте ЕРС первинної обмотки, якщо частота струму $f=50$ Гц, число витків $W_1=500$, амплітуда магнітного потоку $0,0005$ Вб.
6. Напруга живлення первинної обмотки дорівнює 100 В, його частота 50 Гц, число витків первинної обмотки $W_1=1000$. Знайдіть основний магнітний потік.
7. Нарисуйте схему заміщення трансформатора в режимі холостого ходу і покажіть як розраховувати параметри цієї схеми.
8. Яку потужність можна визначити з досліду холостого ходу ?
9. Зобразити принципову схему роботи трансформатора в режимі навантаження. Показати напрямлення ЕРС, струмів, потоків – основного і розсіювання.
10. Поясніть, чи зміняться струми обмоток при зміні навантаження трансформатора, як саме і чому ?
11. Запишіть рівняння МРС і поясніть, як зміняться доданки при збільшенні і зменшенні навантаження.
12. Запишіть рівняння електричного стану для первинної і вторинної обмоток з миттєвими і комплексними значеннями з урахуванням ЕРС розсіювання, а також рівняння з приведеними значеннями.
13. Поясніть, з якою метою параметри вторинної обмотки приводяться до числа витків первинної обмотки.
14. Побудуйте векторну діаграму трансформатора, що працює на активно-індуктивне навантаження, і поясніть порядок її побудови.
15. Нарисуйте повну схему заміщення трансформатора і поясніть її, як визначити параметри схеми заміщення ?
16. Нарисуйте схему досліду короткого замикання трансформатора і вкажіть умови проведення досліду.
17. Яку потужність можна визначити з досліду короткого замикання ?
18. Нарисуйте схему заміщення однофазного трансформатора при короткому замиканні, як визначити параметри схеми заміщення ?
19. Напишіть формулу для визначення активної і реактивної складових напруг короткого замикання.
20. Знайдіть напругу короткого замикання, якщо відомі номінальна потужність $S_{ном}=10$ кВА, потужність втрат короткого замикання $P_{к.ном}=400$ Вт, реактивна складова напруги короткого замикання 3% .
21. При номінальному активному навантаженні активна складова напруги короткого замикання рівна 3% . Визначити напругу в опорі навантаження, якщо номінальна напруга складає 400 В.

22. Знайдіть відсоткову зміну напруги, якщо відомо, що номінальна потужність однорідного трансформатора 10 кВА, потужність втрат короткого замкнення 300 Вт, напруга короткого замкнення 5%, зсув фаз $\varphi_2=60^\circ$, коефіцієнт навантаження 0,8.

23. Зообразіть зовнішню характеристику трансформатора і поясніть її.

24. Перерахуйте потужність втрат в трансформаторі і поясніть, як залежить ККД від коефіцієнта навантаження.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ

МЕТА РОБОТИ: вивчити будову і принцип дії трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором, розрахувати і побудувати на підставі експериментальних даних робочі характеристики асинхронного двигуна.

12.1 Програма роботи

12.1.1. Ознайомитися з будовою лабораторної установки, записати паспортні дані дослідного двигуна та навантаженого генератора, підібрати відповідні їм вимірювальні прилади.

12.1.2. Виміряти напругу мережі живлення, визначити схему з'єднання статорної обмотки, скласти схему для дослідження асинхронного двигуна.

12.1.3. Здійснити прямий пуск асинхронного двигуна на х.х. та визначити кратність пускового струму.

12.1.4. Отримати робочі характеристики двигуна: M , ω_p , I_1 , P_1 , $\cos\phi_1$, $\eta = f(I_2)$.

12.1.5. За дослідними даними побудувати робочі характеристики -- P_1 , ω_p , $\eta = f(I_2)$ в одних координатних осях; -- I_1 , M , $\cos\phi_1$ -- в інших.

12.1.6. З характеристики $\eta = f(I_2)$ визначити максимальне значення ККД і навантаження, при яких ККД максимальний.

12.1.7. Розрахувати максимальний ККД двигуна і його навантаження, при цьому порівняти їх зі значеннями, отриманими експериментально.

12.2 Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

12.2.1. Повторити за підручником [1] теоретичний матеріал; будову та принцип дії трифазного асинхронного двигуна; ковзання та способи його визначення; механічну і робочі характеристики двигуна.

12.2.2. Підготувати протокол випробувань із схемами лабораторних установок і таблицями для занесення результатів дослідів.

12.2.3. За паспортними даними дослідного двигуна розрахувати і побудувати механічну характеристику.

12.2.4. Накреслити наближений вигляд робочих характеристик асинхронного двигуна.

12.2.5. Відповісти на контрольні запитання.

12.3 Основні теоретичні відомості

Асинхронна машина -- машина змінного струму, в якій швидкість ротора при незмінній частоті напруги живлення змінюється в залежності від навантаження валу. Основний робочий режим асинхронної машини - режим двигуна, хоч вона може використовуватися в режимах генератора, електромагнітного гальма і фазорегулятора.

Трифазний асинхронний двигун складається з нерухомого статора та обертового ротора. В пази осердя статора, набраного з окремих, ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі, укладені котушки трифазної статорної обмотки, яка створює обертальне з кутовою швидкістю ω_1 і магнітне поле:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{P}$$

де f_1 - частота струму в обмотці статора;

P- число пар полюсів обмотки.

Ротор асинхронного двигуна також містить осердя, в пази якого укладена обмотка. В залежності від конструкції обмотки розрізняють короткозамкнений і фазний ротор. Короткозамкнений ротор має обмотку, що складається з окремих мідних або алюмінієвих стержнів, які замкнуться накоротко кільцями. В пази осердя фазного ротора закладена катушкоподібна трифазна обмотка, з'єднана зіркою.

Три вільних кінці цієї обмотки виведені на ізольовані один від одного та від вала ротора контактні кільця, до яких за допомогою щіток підключаються додаткові опори.

Створене статорною обмоткою магнітне поле збуджує в обмотці ротора ЕРС, під впливом якої в ній виникають індуктивні струми. Взаємодія магнітного поля статора зі струмами ротора приводить до утворення на роторі електромагнітного моменту, в результаті чого ротор починає обертатися. Очевидно, що виникнення струмів у роторі й утворення обертового моменту можливі лише при відносному русі проводів ротора в магнітному полі машини, тобто швидкості обертання ротора двигуна ω_2 завжди менша швидкості обертання магнітного поля машини ω_1 .

Швидкість обертання поля відносно ротора називають швидкістю ковзання:

$$s = \omega_1 - \omega_2$$

При аналізі роботи асинхронних машин зручно користуватися безрозмірною величиною

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

яка має назву ковзання.

Швидкість обертання ротора на х.х. двигуна мало відрізняється від швидкості обертання магнітного поля статора і ковзання в цьому режимі складає доли відсотка. При збільшенні навантаження швидкість обертання ротора трохи зменшується, а ковзання збільшується, досягаючи при номінальній потужності на валу значення $s_{ном} = (3... 8)\%$.

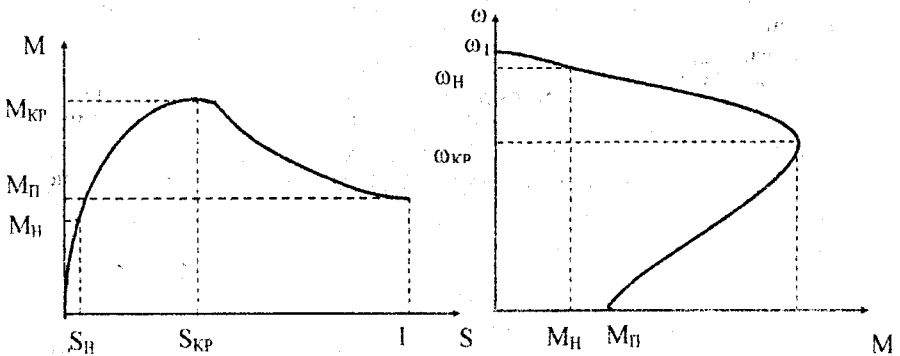


Рисунок 12.1

Рисунок 12.2

Залежність обертового моменту M від ковзання S визначається кривою $M=f(S)$ (рис. 12.1.). Номінальному моменту M_n , відповідає номінальне ковзання S_n . Короткочасне перевантаження асинхронного двигуна визначається критичним моментом $M_{кр}$, якому відповідає ковзання $S_{кр}$. Відношення критичного моменту до номінального характеризує перевантажувальну здатність двигуна:

$$\lambda = \frac{M_{кр}}{M_n} \approx 1,8 \dots 3$$

Пусковий момент $M_{п}$ повинен бути трохи більшим від номінального.

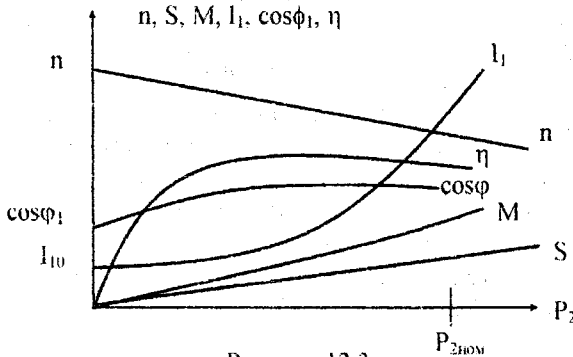


Рисунок 12.3

Звичайно $M_{п} \approx 1,2 M_{ном}$. Властивість асинхронного двигуна визначають з його механічної $\omega = f(M)$ (рис. 12.2.) і робочих ω_2 , S, M, I_1 , $\cos\phi_1$, $\eta = f(P_2)$ характеристик (рис. 12.3.), які отримують при незмінних напрузі U_1 і частоті f_1 , мережі живлення.

12.4 Опис лабораторного стенда

Експериментальне дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором виконують на стенді, зображеному на рис. 12.4.

Момент опору на валу двигуна утворюється генератором постійного струму G з незалежним збудженням. Для вимірювання струму I_1 , напруги U, та коефіцієнта потужності $\cos\phi_1$ в коло статора дослідного двигуна ввімкнені амперметр A, вольтметр V та фазометр $\cos\phi$.

Обмотка статора дослідного двигуна розрахована на напругу 220В і в залежності від напруги в мережі з'єднується трикутником або зіркою.

Запуск в хід двигуна здійснюється на х.х., тобто при не навантаженому генераторі ($I_g = 0$, $I_v = 0$). При вмиканні автоматичного вимикача ВА на обмотку збудження подається напруга U_v , після чого за допомогою регулювального реостата R_v на затискачах якоря виставляють номінальну напругу. Струм якоря генератора змінюється зменшенням опору якорного кола за допомогою магазину опорів R.

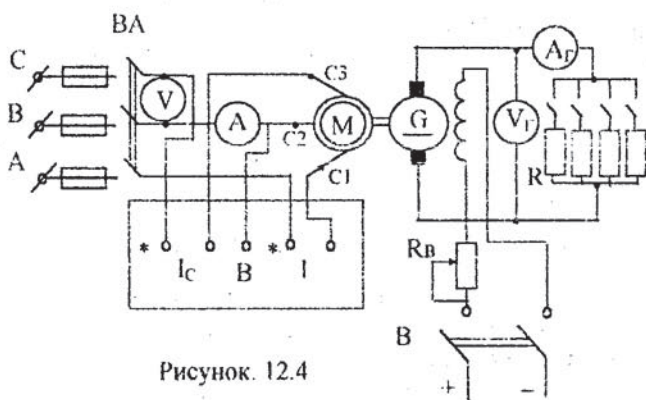


Рисунок. 12.4

Ковзання двигуна вимірюється стробоскопічним методом, котрий дає можливість безпосередньо виміряти частоту обертання та ковзання $n_s = n_1 - n_2$. Для вимірювання швидкості обертання стробоскопічним методом на вал двигуна насаджують диск, розділений поперемінно на однакові білі та чорні сектори, які освітлюються миготливим з частотою струму в мережі світлом неонові лампи. Якщо частота спалаху лампи при цьому

дорівнює частоті обертання диска, то освітлені сектори здаються спостерігачу в наслідок стробоскопічного ефекту нерухомими. Якщо ж частота спалахів лампи більша частоти обертання диска, то спостерігається повільне його обертання проти ходу машини з швидкістю $n_1 - n_2$. Визначивши явне число повних обертів диска Δn за час Δt , знаходять частоту обертання ковзання

$$n_s = \frac{60 \Delta n}{\Delta t}$$

а потім значення ковзання

$$S = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

і частоту обертання ротора

$$n_2 = n_1(1 - S)$$

12.5 Порядок виконання лабораторної роботи

12.5.1. Зібрати схему лабораторної установки (див. рис. 12.4.)

12.5.2. Ввімкнути автоматичний вимикач живлення ВА, запустити двигун і виміряти всі параметри, що характеризують роботу двигуна на х.х. Результати вимірювань занести в таблицю 12.1.

12.5.3. Ввімкнути напругу збудження, збудити генератор, що навантажуються. За допомогою регулювального реостата в ланцюгу збудження встановити на затискачах якірної обмотки номінальну напругу $U_{я} = U_{як}$. Далі змінюють струм генератора I_r в таких границях, щоб струм двигуна I змінювався від стуму х.х. I_{10} до $1,2I_k$. Зняти 5-6 точок і результати занести в таблицю 12.1.

Таблиця 12.1

| № п/п | Дослідні величини | | | | | | Розраховані величини | | | | | | | |
|----------|-------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------|---------------|--------|---------------|-----------|------|
| | U_1 , В | I_1 , А | P_1 , кВт | $U_{я}$, В | $I_{я}$, А | n_2 , хв ⁻¹ | S | n_1 , хв ⁻¹ | η_r | P_r , Вт | η | P_2 , Вт | M, Н·м | cosφ |
| 1...6 | | | | | | | | | | | | | | |

12.5.4. За результатами вимірювань розраховують: частоту обертання магнітного поля ковзання:

$$n_2 = n_1(1 - S);$$

потужність генератора:

$$P_r = U_2 I_2 = U_{я} I_{я};$$

потужність на валу двигуна:

$$P_2 = P_r / \eta_r;$$

де η - ККД генератора, визначається з характеристики $\eta = f(P_r)$ приведеної на лабораторному стенді;

механічний момент на валу двигуна: $M = 9550 P_2 / n_2$

коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}$$

коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

12.5.5. Механічну характеристику можна побудувати за паспортними даними двигуна ($P_{2к}$, n_n , K_M , K_n). Для цього визначають:

номінальний момент двигуна $M_n = 9550 P_2 / n$

критичний момент $M_{кр} = \lambda M_n$

номінальне ковзання $S_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

критичне ковзання $S_{кр} = S_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right)$

момент двигуна і його частоту обертання для ряду значень ковзання ($S=0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$):

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}; \quad n_2 = n_1(1-S)$$

На рис.12.5 зображено залежність η від навантаження.

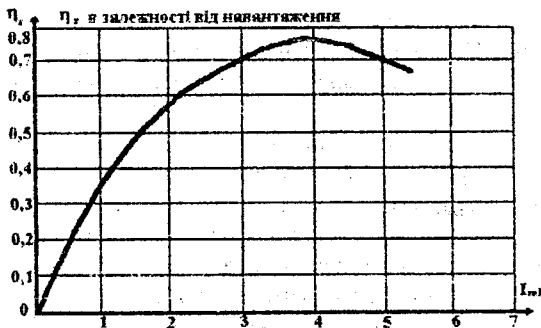


Рисунок. 12.5

12.6 Завдання на підготовку до лабораторно-практичного заняття.

Перед виконанням лабораторної роботи необхідно розв'язати декілька задач, умови яких приведені далі.

Перед розв'язуванням задач рекомендується ознайомитись з теоретичними відомостями, які приведені в дійсних методичних вказівках і в [1. с.382-427; 2. с.329-322].

12.7 Питання для самоконтролю і задачі для самостійного розв'язування

1. Зообразіть ескіз будови трифазного асинхронного двигуна і поясніть призначення його основних частин.

2. Як з'єднати між собою обмотки статора і ротора. Що представляє собою магнітопровід трифазного асинхронного двигуна ?

3. Зообразить з'єднання обмоток статора в зірку і трикутник.

4. Умови, необхідні для отримання обертового магнітного поля.

5. Що розуміють під режимом холостого ходу двигуна? Струм холостого ходу асинхронного двигуна. Порівняти це значення зі струмом холостого ходу трансформатора. Чим пояснити різницю між ними ?

6. Що таке ковзання? Формула, яка визначає ковзання.

7. Зв'язок між частотою струму ротора і статора.

8. Запишіть формули ЕРС, яка знаходиться в обмотці статора; в обмотці нерухомого ротора і в обмотці обертового ротора.

9. Відомо, що $f_1=50$ Гц, ЕРС і індуктивний опір нерухомого ротора відповідно $E_2=129$ В і $X_2=130$ Ом і ковзання складас $S=3\%$. Знайти f_2 , E_{2s} і X_{2s} .

10. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором живиться від мережі лінійною напругою $U_1=380$ В при частоті $f_1=50$ Гц. Номінальні дані двигуна: $P_{ном}=20$ кВт, $n_{ном}=960$ об/хв, $\cos\phi_1=0.84$, $\eta_{ном}=0.88$, $K_n=1.8$. Визначити: номінальний струм в фазі обмотки статора, ковзання, номінальний момент на валу ротора, критичний момент і критичне ковзання. Побудувати механічну характеристику $n=f(M)$.

11. Якщо відома ЕРС розсіювання статора і ротора, знайти їх індуктивний опір.

12. Як змінюються струми в рівнянні МРС зі збільшенням і зменшенням навантаження ?

13. Напишіть рівняння стану асинхронного двигуна.

14. Напишіть рівняння другого закону Кірхгофа для обмотки статора і для приведених параметрів обмотки ротора.

15. Рівняння другого закону Кірхгофа для ротора.

16. Схеми заміщення для фази двигуна.

17. Обертовий момент двигуна, зв'язок з напругою U_1 і ковзання S .

18. Що називається механічною характеристикою ?

19. Зобразить характеристики $M=f(S)$ і $n=f(M)$ в межах відповідно від $S=0$ до $S=1$ і від $n=n_1$ до $n=0$.

20. Покажіть на характеристиці $M=f(S)$ точки з координатами $(S_{ном}, M_{ном})$, $(S_{кр}, M_{кр})$, (S_n, M_n) і поясніть особливості режиму роботи в цих точках.

21. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором живиться від мережі з нелінійною напругою $U_1=380$ В при частоті $f=50$ Гц. Номінальні дані двигуна: $U_{ном}=380/220$ В, $P_n=330$ кВт, $n=720$ об/хв, $\eta_{ном}=0.87$, $\cos\phi_{ном}=0.81$, $\cos\phi_{к}=0.36$, $K_1=6.5$. Визначити схему з'єднання фаз обмотки статора, номінальний момент, номінальний струм, що споживається двигуном з мережі, опір короткого замикання (на фазу), активні і

індуктивні опори фаз статора і ротора (для ротора приведені значення), критичне ковзання.

22. Асинхронний двигун з фазним ротором, який приводить в рух підйомний механізм, номінальні данні: $P_{ном}=10$ кВт, $n_{ном}=1460$ об/хв, $R'_2=0,18$ Ом, $X_k=0,52$ Ом, $K_n=2$. Визначити опір $R'_{доб}$, який повинен бути відключений в фазу ротора для того, щоб початковий пусковий момент електродвигуна дорівнював критичному.

23. В чому полягають недоліки прямого запуску асинхронного двигуна?

24. Як розрахувати пусковий струм і пусковий момент асинхронного двигуна?

25. В чому полягає ефект витиснення струму?

26. Напруга мережі 380 В. Номінальна напруга асинхронного двигуна $U_{ном}=380/220$ В. Чи можливо застосувати при запуску двигуна перемикач обмоток статора із зірки на трикутник?

27. Напруга схеми запуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при вмиканні в мережу статора пускових резисторів, пускових котушок і автотрансформатора. В чому переваги і недоліки розглянутих способів запуску?

28. Електрична схема запуску асинхронного двигуна з фазовим ротором: використовуючи механічні характеристики, поясніть порядок запуску.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

МЕТА РОБОТИ: визначити залежність коефіцієнта потужності асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором від навантаження; ознайомитись з основними способами підвищення коефіцієнта потужності в електричних колах з асинхронними двигунами.

13.1 Програма роботи

13.1.1. Ознайомитись з паспортними даними асинхронного двигуна і навантаженого генератора постійного струму і підібрати відповідні вимірювальні прилади.

13.1.2. Зібрати схему, зображену на рис. 13.1. Обмотки статора з'єднати за схемою зірка або трикутник в залежності від напруги мережі і паспортних даних дослідного двигуна.

13.1.3. Відключити двигун при відімкнутих батареях конденсаторів і, змінюючи навантаження на валу, отримати залежність коефіцієнта потужності від навантаження.

13.1.8. Зробити висновки про завантаження мережі до і після компенсації реактивної потужності.

13.2 Програма домашньої підготовки до виконання лабораторної роботи

13.2.1. Повторити за підручником [1] теоретичний матеріал: активна, реактивна і повна потужності кола змінного струму; коефіцієнт потужності; природні та штучні способи підвищення коефіцієнта потужності.

13.2.2. Підготувати протокол випробувань зі схемами лабораторних установок і таблицями для занесення результатів дослідів.

13.2.3. Розрахувати смінь конденсаторної батареї (на одну фазу), яка забезпечила б підвищення коефіцієнта потужності до значення $\cos\varphi=0,95$ при номінальному моменті навантаження на валу двигуна (вказівка: скористуватися паспортними даними дослідного двигуна).

13.2.4. Побудувати векторні діаграми струмів електричного кола до і після компенсації реактивної потужності.

Таблиця. 13.1

| Режим роботи | Виміряно | | | | | | Розраховано | | | | | |
|-----------------|------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------------|-------------|--------|---------------|-----------|
| | U_1 В | I_1 А | P_1 Вт | $U_{Г,}$ В | $I_{Г,}$ А | $I_{С,}$ А | $P_{Г,}$ Вт | $\eta_{Г,}$ | P_2 Вт | η | $\cos\varphi$ | φ |
| Без компенсації | | | | | | | | | | | | |
| Із компенсацією | | | | | | | | | | | | |

13.2.5. Відповісти на контрольні запитання до лабораторної роботи.

13.3 Основні теоретичні відомості

Розглянемо деякі положення і визначення до поняття "реактивна потужність". Нехай приймач електричної енергії присидано до джерела синусоїдальної напруги $U = \sqrt{2}U \sin \omega t$. Він споживає синусоїдальний струм $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$, зсунутий за фазою відносно напруги на кут φ (рис. 13.2, а).

Значення миттєвої потужності на затискачах визначається виразом :

$$P = Ui = 2UI \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (13.1)$$

тобто сумою двох величин, одна з яких постійна в часі, а друга пульсує з подвійною частотою (рис. 13.2,б).

Середнє значення миттєвої потужності P за період напруги живлення T повністю визначається першим доданком. Дійсно,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)] dt = UI \cos \varphi + 0$$

$$P = UI \cos \varphi = RI^2.$$

Середнє значення від другого доданка миттєвої потужності (13.1) за час T дорівнює нулю, тобто на її утворення не вимагається будь-яких матеріальних витрат і тому вона не може здійснювати корисну роботу. Її присутність вказує, що між приймачем і джерелом відбувається обмін енергією. А це можливо лише в тому випадку, якщо в електричному колі існують особливі, так звані реактивні елементи, здатні накопичувати і віддавати електромагнітну енергію - ємнісний та індуктивний.

Повна потужність на затискачах приймача в комплексній формі:

$$S = \dot{U} I = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi \quad (13.2)$$

де \dot{U} - комплекс напруги; I - спряжений комплекс струму.

Величина $UI \sin \varphi$ називається реактивною потужністю і характеризує обмін енергією між джерелом і приймачем, а $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності.

Прийнято вважати, що якщо струм, який споживається, відстає за фазою від напруги (індуктивний характер навантаження), то реактивна потужність має позитивний знак, а якщо струм випереджає напругу (ємнісний характер навантаження) - реактивна потужність має від'ємний знак.

З рівняння (13.2) маємо:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \frac{P}{Q} = \operatorname{tg} \varphi; \frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (13.3)$$

$$P = S \cos \varphi, Q = S \sin \varphi$$

Основні споживачі реактивної потужності на промислових підприємствах — асинхронні двигуни (60... 65% загального споживання), трансформатори (20... 25%), вентильні перетворювачі, реактори, повітряні електричні мережі і інші приймачі (10%).

Передача значної реактивної потужності по лініях і через трансформатори не вигідна з таких основних причин:

13.3.1. Виникають додаткові втрати активної потужності й енергії в усіх елементах електропостачання (генераторах, трансформаторах, ЛЕП), зумовлені завантаженням їх реактивною потужністю. Так, при передачі активної P та реактивної Q потужності через елемент системи електропостачання з опором R втрати активної потужності становлять

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_P + \Delta P_Q \quad (13.4)$$

Додаткові втрати активної потужності ΔP_P викликані проходженням реактивної потужності Q , пропорційні її квадрату.

13.3.2. Завантаження реактивною потужністю ліній електропередач і трансформаторів зменшує їх пропускну здатність і потребує збільшення перерізу проводу повітряних і кабельних ліній, збільшення номінальної

потужності і кількості трансформаторів підстанцій і т.п.

У зв'язку з цим реактивна потужність, яка споживається для кожного підприємства, суворо нормується енергосистемою. Оскільки основними споживачами реактивної потужності є асинхронні двигуни, то розглянемо режими їх роботи.

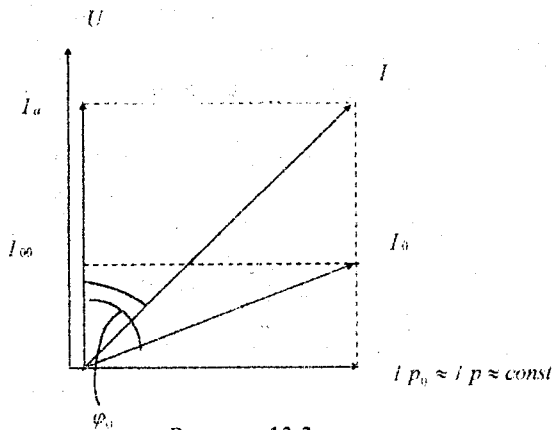


Рисунок 13.3

При вмиканні двигуна в мережу з напругою U він буде споживати струм I , який відстає від прикладеної напруги на кут φ (рис 13.3). Активна потужність P , яка споживається, і активна складова струму $I_a = I \cdot \cos\varphi$ визначаються величиною навантаження. Реактивна потужність Q , реактивна складова струму $I_r = I \cdot \sin\varphi$ визначаються конструктивними особливостями двигуна та прикладеною напругою і практично не залежать від навантаження.

В режимі х.х., коли активна потужність незначна, коефіцієнт потужності також буде відносно невеликим. Із збільшенням навантаження на валу двигуна збільшуються P і I_a , а Q і I_r практично не змінюються, що призводить до збільшення коефіцієнта потужності двигуна. Навантаження двигуна приводить до зменшення I_a , а отже, до збільшення кута φ і зменшення коефіцієнта потужності. При номінальному навантаженні асинхронні двигуни мають $\cos\varphi$ в межах 0,7... 0,9.

Таким чином, асинхронні двигуни завантажують генератори електричних станцій і мережу живлення реактивною потужністю, що є суттєвим недоліком двигунів.

Збільшення коефіцієнта потужності асинхронних двигунів може бути досягнуто дійсними і штучними методами.

До перших відносяться:

- обмеження часу роботи двигунів на х.х.;
- заміна малонавантажених асинхронних двигунів двигунами меншої потужності;
- завантаження двигунів до їх номінальної потужності;
- зниження напруги двигунів, що систематично працюють з малим навантаженням.

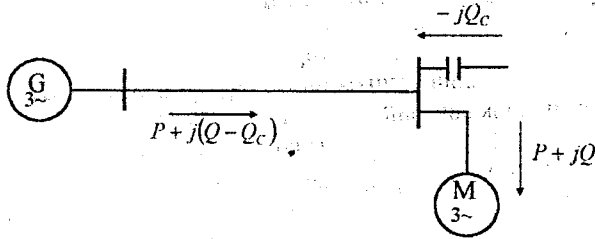


Рисунок 13.4

Використання всіх перерахованих заходів дає змогу збільшити коефіцієнт потужності до значень 0,8... 0,85. Подальше збільшення коефіцієнта потужності може бути досягнуто штучним шляхом за допомогою компенсувальних пристроїв — батарей статичних конденсаторів або синхронних компенсаторів, які є джерелами реактивної потужності. В цьому випадку мережа живлення частково ($\cos\varphi < 1$) або повністю ($\cos\varphi = 1$) розвантажується від реактивної потужності (рис. 13.4) $Q_{\text{лен}} = Q - Q_c$, що в решті речей призводить до зменшення втрат активної потужності та електроенергії від протікання реактивних струмів.

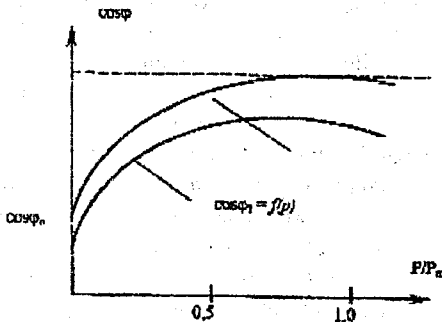


Рисунок 13.5

На промислових підприємствах штучне підвищення коефіцієнта потужності в більшості випадків здійснюється за допомогою статичних батарей конденсаторів. В залежності від напруги електричної мережі і

номінальної напруги батарей статичних конденсаторів вони можуть бути включені зіркою або трикутником.

При включенні батарей трикутником сміньє однієї фази можна

$$\text{визначити таким чином: } C = \frac{P}{\sqrt{3}\omega U^2} (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$$

де P - активна потужність двигуна; U - лінійна напруга мережі; φ_1 і φ_2 - відповідно кут між векторами струму і напруги до і після компенсації.

Залежність $\cos\varphi_1$ до компенсації і $\cos\varphi_2$ після компенсації від навантаження показано на рис. 13.5.

13.4 Опис лабораторного стенда

Принципова схема лабораторного стенда зображена на рис. 13.1. Дослідний трифазний асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором може бути підключений до мережі трифазного струму з лінійною напругою 380 або 220 В. В залежності від цього, його статорна обмотка з'єднується зіркою або трикутником.

До затискачів двигуна приєднана батарея конденсаторів, сміньє якої може змінюватися за допомогою перемикачів, встановлених на лицьовій панелі лабораторної установки.

Навантаження на валу двигуна створюється за допомогою генератора постійного струму з незалежним збудженням. Змінюючи опір якірного ланцюга R_{II} будемо змінювати і його електромагнітний момент, який є навантажувальним для асинхронного двигуна.

13.5 Порядок виконання лабораторної роботи

13.5.1. При ввімкнених батареях конденсаторів і навантажувальному генераторі при відсутності збудження виконати запуск двигуна. Ввімкнути обмотку збудження 03 на постійну напругу і за допомогою регульовального реостата R_p встановити на затискачах обмотки якоря генератора номінальну напругу.

Зробити 5-6 вимірювань при різних навантаженнях двигуна (починаючи з х.х. і до номінального навантаження двигуна). Вимірювання на х.х. виконати при розімкненому вимикачеві в колі навантаження генератора. Покази приладів записати в таблицю 13.1.

13.5.2. В кожну фазу мережі ввімкнути батарею конденсаторів сміньєю, яка забезпечує роботу асинхронного двигуна при номінальному навантаженні з $\cos\varphi=0,95$.

Для тих же навантажень, що і в п. 13.5.1. зробити 5-6 вимірювань. Покази приладів записати в таблицю 13.1.

13.5.3. Основні розрахункові формули:

-- потужність генератора $P_r=U_r I_r$,

-- потужність навантаження на валу двигуна

$$P_2 = P_r / \eta_r,$$

де η_r -- ККД навантаженого генератора (визначається по кривій $\eta_r = f(P_r)$);

-- потужність, яку споживає двигун з мережі

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \phi_1;$$

ККД двигуна, який використовується $\eta = P_2 / P_1$.

13.6 Питання для самоконтролю

1. Що таке реактивна потужність і які процеси в електричних системах вона характеризує ?
2. Якими показниками характеризується робота електричних приймачів при активно-індуктивному характері навантаження ?
3. З яких міркувань визначається ступінь доцільності компенсації реактивної потужності ?
4. Чим пояснити відносно низьке значення коефіцієнта потужності в асинхронних двигунах ? Чому $\cos \phi$ в асинхронних двигунах менший, ніж у трансформаторів ?
5. Чому включення батареї конденсаторів дає можливість штучно підвищити коефіцієнт потужності установки ?
6. Чим пояснюється низьке значення коефіцієнта потужності при роботі двигуна на Х.Х. ?
7. Як впливає значення повітряного зазору на коефіцієнт потужності ?
8. Чому зі збільшенням навантаження двигуна збільшується коефіцієнт потужності ?

[1,2,8]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО І ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

МЕТА РОБОТИ: вивчити конструкцію генератора постійного струму і дослідити його роботу на х.х. і під навантаженням; отримати його характеристики х.х., зовнішню і регульовальну.

14.1 Програма роботи

14.1.1. Ознайомитись з обладнанням, приладами і апаратами експериментальної установки, записати їх технічні дані в протокол випробувань.

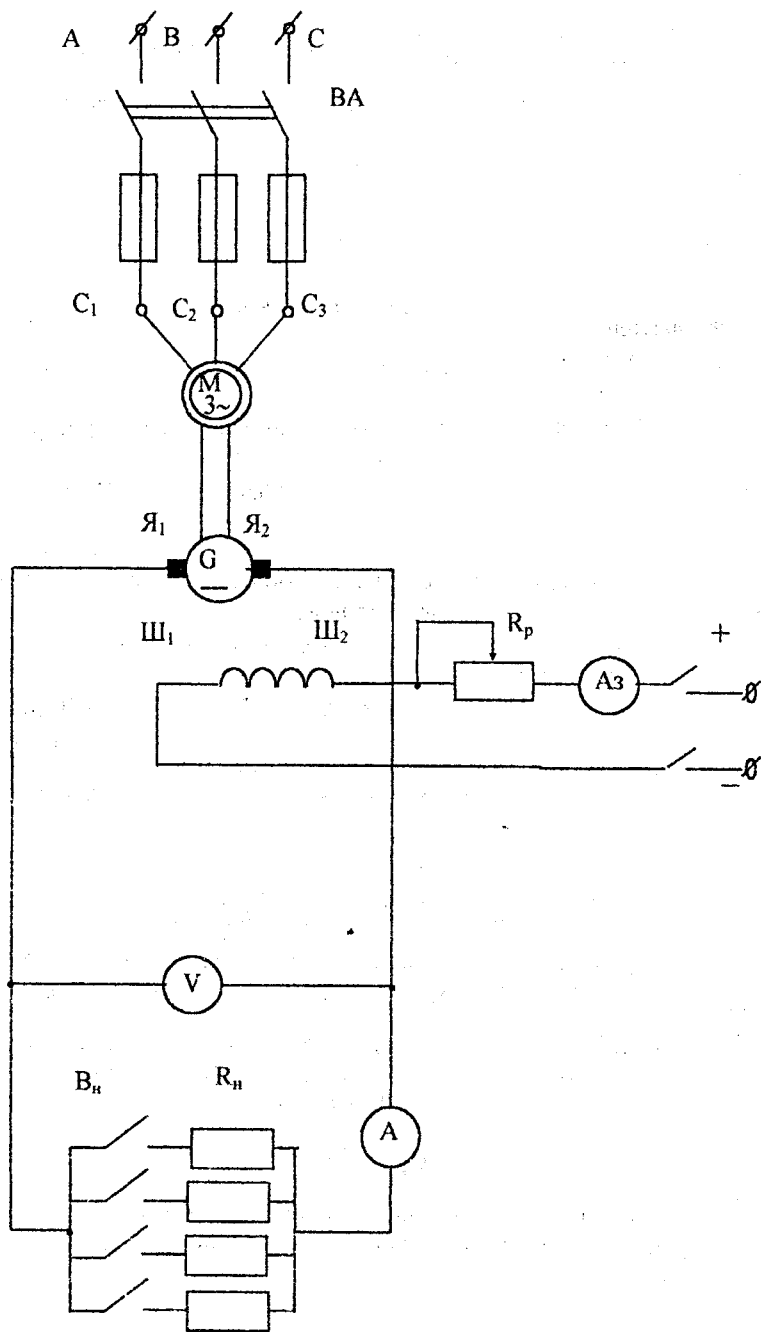


Рисунок.14.1

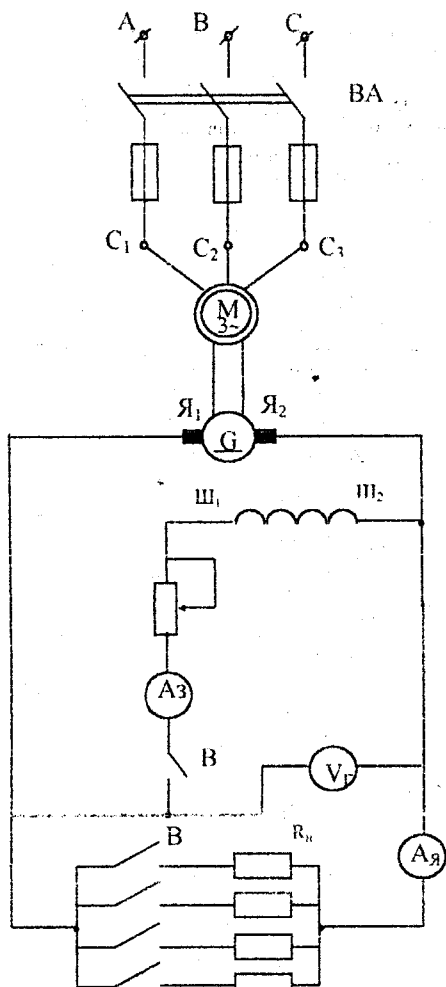


Рисунок.14.2

14.1.2. Скласти схему установки для випробування генератора постійного струму незалежного збудження (рис. 14.1.).

14.1.3. Отримати характеристику холостою ходу $E=f(I_b)$ при $I_a=0$ і $n=const$.

14.1.4. Здійснити режим навантаження генератора і зняти його зовнішню характеристику $U=f(I_a)$.

14.1.5. Отримати регульовальну характеристику $I_b=f(I_a)$ при $U=U_n=const$.

14.1.6. Скласти схему установки для випробування генератора постійного струму паралельного збудження (рис. 14.2.).

14.1.7. Здійснити запуск установки і добитися самозбудження генератора.

14.1.8. Здійснити режим навантаження і отримати зовнішню і регульовальну характеристики.

14.1.9. Накреслити в масштабі характеристику х.х. генератора постійного струму з паралельним збудженням $E=f(I_b)$ при $n=const$. Визначити величину ЕРС, яка збуджується потоком залишкового магнетизму і виразити у відсотках по відношенню до номінальної напруги.

14.1.10. Побудувати зовнішню характеристику генератора незалежного збудження і в тих же координатних осях зовнішню характеристику генератора паралельного збудження. З зовнішньої характеристики генератора незалежного збудження визначити еквівалентний опір обмотки якоря. Для різних способів збудження оцінити відсоткову зміну напруги при номінальному навантаженні.

14.1.11. Побудувати регульовальні характеристики генератора паралельного і змішаного збудження.

14.1.12. Зробити висновки за результатами виконаної роботи. Порівняти характеристики генераторів незалежного і паралельного збудження. Оцінити переваги і недоліки кожного з генераторів.

14.2 Програма домашньої підготовки до виконання лабораторної роботи

14.2.1. Ознайомитись із схемами включення обмоток збудження генераторів постійного струму.

14.2.2. Перелічити умови самозбудження генератора паралельного збудження при незмінній швидкості і напрямку обертання якоря.

14.2.3. Вивчити методику визначення еквівалентного опору обмотки якоря генератора незалежного збудження за його зовнішньою характеристикою.

14.2.4. Приготувати протокол випробувань з таблицями для запису показів приладів.

14.2.5. Накреслити наблизений графік характеристики х.х., зовнішніх і регульовальних характеристик генераторів постійного струму з різними способами збудження.

14.2.6. Ознайомитись з методиками отримання характеристик генераторів постійного струму: х.х., зовнішньої і регульовальної.

14.3 Основні теоретичні відомості

Генератор постійного струму складається з нерухомого статора і якоря, який обертається.

Статор генератора має станину у вигляді порожнього сталюого циліндра, на внутрішній поверхні якого закріплене парне число головних полюсів. Кожний полюс має сердечник і обмотку, яка збуджує основне магнітне поле машини.

Якір генератора постійного струму складається з сердечника, який набирається з окремих ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі. Сердечник закріплений на валу машини і на зовнішній поверхні має пази, в які закладається обмотка якоря.

Якщо обмотка збудження живиться від стороннього джерела електричної мережі, тоді генератор називають генератором з незалежним збудженням, якщо ж обмотка збудження отримує живлення від обмотки якоря, тоді маємо генератори із самозбудженням.

При обертанні якоря в нерухомому магнітному полі машини в обмотці збуджується змінна ЕРС, яка за допомогою колектора і системи струмопровідних щіток перетворюється в ЕРС незмінного напрямку:

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

де P - число пар полюсів машини; n - частота обертання якоря; N - число активних провідників якоря; Φ - значення магнітного потоку.

З останнього виразу видно, що ЕРС, яка збуджується в обмотці якоря

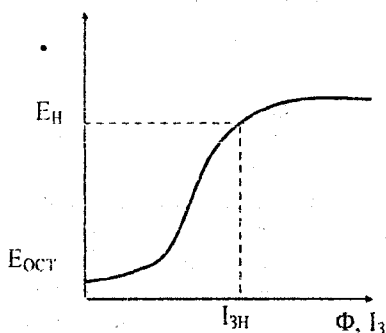


Рисунок 14.3

при незмінній частоті його обертання, залежить тільки від магнітного потоку або струму збудження. Залежність E отриману при відсутності струму в обмотці якоря, називають характеристикою х.х. (рис. 14.3.). При відсутності струму в обмотці збудження потік залишкового магнетизму збуджує в обмотці якоря невелику ЕРС $E_{ост}$, величина якої складає 2...6%. Якщо обмотка збудження живиться

від обмотки якоря, то для самозбудження необхідна наявність в магнітному колі генератора достатнього за величиною залишкового (магнетизму) магнітного потоку.

Під дією цього потоку в обмотці якоря збуджується ЕРС $E_{ост}$ і в обмотці збудження потече струм

$$I_3 = \frac{E_{\text{ост}}}{R_3 + R_p}$$

R_3 - опір обмотки збудження;

R_p - опір регулювального реостата.

Струм збудження створює в обмотці головних полюсів основний магнітний потік, який для запобігання розмагнічування машини повинен збігатися за напрямом відносно залишкового. Для успішного самозбудження генератора необхідно, щоб опір кола збудження був менший деякого значення, яке називають критичним.

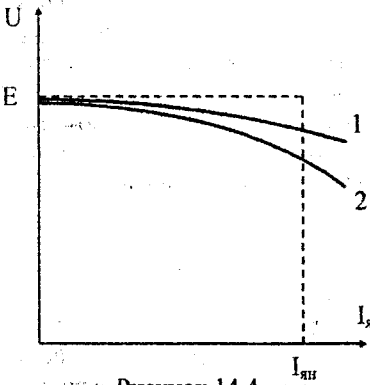


Рисунок 14.4

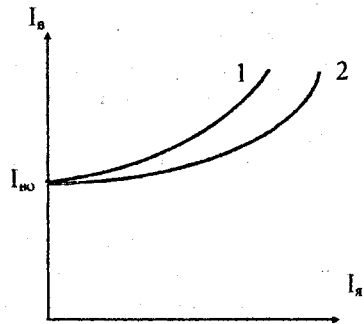


Рисунок 14.5

Якщо обмотку якоря збудженого генератора приєднати до навантаження, то в ній потече струм I_a і на затискачах якоря встановиться напруга $U = E - I_a R_a$, де R_a - опір якорного кола.

Збільшення струму якоря призводить до зменшення напруги U (крива 1 на рис. 14.4.). Залежність $U(I_a)$ називають зовнішньою характеристикою генератора. Струм якоря створює магнітний потік Φ_a , який при насиченні магнітного поля ослаблює основне магнітне поле. В результаті цього напруга буде зменшуватись швидше. В генераторі паралельного збудження зменшення напруги на затискачах якоря обмотки призводить до зменшення струму збудження, а значить магнітного потоку Φ і ЕРС. В результаті цього зовнішня характеристика генератора паралельного збудження буде розташована нижче (крива 2 на рис. 14.4.), у порівнянні з генератором паралельного збудження.

Регулювання напруги генератора здійснюється примусово зміною струму збудження. Залежність $I_B(I_a)$, яка показує як потрібно змінювати

струм збудження, щоб при змінному струмі навантаження напруга на затискачах обмотки якоря залишалась постійною називають регульовальною характеристикою (рис. 14.5.).

Для підтримання постійної напруги при однаковому навантаженні в генераторі паралельного збудження потрібне більш сильне регулювання (крива2), ніж в генераторі з незалежним збудженням (крива 1).

14.4 Будова лабораторного стенда

Дослідження генераторів постійного струму незалежного і паралельного збудження виконують на установці, принципова схема якої зображена на рис. 14.1 та 14.2.

Привідним пристроєм якоря генератора G є трифазний асинхронний двигун M з короткозамкненим ротором. В залежності від лінійної напруги мережі живлення статорна обмотка його збирається за схемою трикутника або зірки.

В колі генератора передбачені прилади, за допомогою яких змінюють напругу, струм навантаження та струм збудження. Навантаження генератора здійснюється за допомогою опору навантажувального реостата R_n за допомогою вимикачів B_n .

В генераторі з незалежним збудженням обмотка збудження живиться від джерела постійного струм, а в генераторі з паралельним збудженням - від обмотки якоря.

Результуючий реостат R_n служить для зміни струму збудження, а вимикач B_n - для розриву кола збудження.

14.5 Порядок виконання роботи

Зібрати схему установки для дослідження генератора постійного струму незалежного збудження (див. рис. 14.1.). Підключити до джерела струму первинний двигун. Перевірити правильність напрямку обертання у відповідності з напрямком стрілки, що вказана на корпусі генератора. Якщо напрям обертання протилежний вказаному, здійснити реверс первинного двигуна, для чого слід поміняти місцями дві фази статорної обмотки. Зняти характеристику $x.x.$, для чого за допомогою регульовального реостата R_p встановити такий струм збудження, при якому напруга на затискачах якорної обмотки вища номінальної напруги генератора на 20%. Потім зменшувати струм збудження до мінімально можливого значення, виконуючи помітки і записуючи покази приладів.

За допомогою вимикача B_3 розірвати коло збудження і записати ЕРС, яка обумовлена залишковою намагніченістю магнітного кола машини.

Ввімкнути B_3 і виконати відліки на приладах. Потім, переміщуючи повзунок регульовального реостата R_p в зворотному напрямку, збільшувати струм збудження і записувати відповідні йому напруги. Струм збудження збільшувати доти, поки напруга на затискачах генератора не перевищить

номінальну на 20%. При зменшенні струму збудження і при його збільшенні виконати 5-6 вимірювань.

Результати спостережень записати в таблицю 14.1.

Таблиця 14.1

| I_3, mA | | | | | |
|----------------------------------|--|--|--|--|--|
| E при зменшенні $I_3, \text{В}$ | | | | | |
| E при збільшенні $I_3, \text{В}$ | | | | | |

Зовнішня характеристика знімається при незмінному опорі в колі збудження. Регулюючи навантаження і струм збудження встановити номінальний режим, при якому генератор працює при номінальній напрузі і номінальному струмові. В подальшому опір регульовального реостата не змінювати. Відключити навантажений реостат і записати показання приладів на х.х. Потім зміною числа ввімкнених резисторів навантажувального реостата збільшити струм навантаження генератора до $1,2I_{\text{ном}}$.

Результати спостережень занести в таблицю 14.2.

Таблиця 14.2

| Напруга генератора $U, \text{В}$ | Струм, А | | |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|-------------|
| | навантаження I_H | збудження I_3 | якоря I_A |
| | | | |

Для отримання регульовальної характеристики необхідно відключити навантаження генератора і з допомогою регульовального реостату встановити номінальну напругу. Записати, який при цьому буде струм збудження. Потім навантажувати генератор струмами, близькими до 20, 40, 60, 80, 100, 120 % від номінального і кожного разу змінювати струм збудження таким чином, щоб напруга генератора залишалась номінальною.

Результати спостережень занести в таблицю 14.3.

Таблиця 14.3

| Напруга генератора $U, \text{В}$ | Струм, А | | |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|-------------|
| | навантаження I_H | збудження I_3 | якоря I_A |
| | | | |

Для досліджень характеристик генератора постійного струму паралельного збудження складають схему (рис. 14.2.). Потім перевіряють вплив регульовального опору R_3 в колі обмотки збудження і полярного

підключення обмотки збудження до обмотки якоря на процес самозбудження.

Зовнішня і регульовальна характеристики паралельного збудження знімаються так само, як для генератора незалежного збудження.

14.6 Завдання на підготовку до лабораторно – практичного заняття

1. Повторити теоретичний матеріал: будову і принципи дії генератора постійного струму; способи збудження і умови самозбудження; основні характеристики генераторів з різними способами збудження [1, с.332-376; 2, с.389-408]
2. Розв'язати задачі за вказівкою викладача із запропонованих даних.
3. Підготувати в робочому зошиті протокол лабораторних випробувань електричних машин.

14.7 Питання для самоконтролю і задачі для самостійного розв'язування

1. Поясніть принцип роботи машини постійного струму в режимі генератора. Яка роль електромагнітного моменту і ЕРС в цьому режимі?
2. Будова і призначення основних частин машин постійного струму.
3. ЕРС і електромагнітний момент генератора постійного струму.
4. Поясніть фізичну сутність явища реакції якоря.
5. Фізичні процеси при комутації і види комутації.
6. Напишіть формули, які характеризують роботу генератора постійного струму.
7. Зобразіть схеми генераторів незалежного, паралельного і мішаного, покажіть на них струми і ЕРС.
8. Вкажіть умови, при яких знімається характеристика холостого ходу. Поясніть хід характеристики.
9. Порівняйте зовнішні характеристики різних видів генераторів і поясніть різницю між ними.
10. Поясніть процес самозбудження генераторів постійного струму, умови самозбудження.
11. Генератор незалежного збудження, який має опір якоря при робочій температурі $R_a=0,004$ Ом, навантажений зовнішнім опором $R_{нн}=0,5$ Ом. Визначте ЕРС на затискачах генератора в номінальному режимі навантаження при напрузі генератора $U_n=230$ В, електромагнітну і корисну потужність генератора.
12. Генератор незалежного збудження при номінальному навантаженні має $U_n=230$ В, струм навантаження $I_n=6,52$ А, ККД $\eta_n=0,8$. Визначте номінальну потужність приводного двигуна і сумарні затрати потужності в генераторі.
13. Генератор паралельного збудження при $U_n=230$ В віддає в навантаження струм $I_n=200$ А. Розрахувати електромагнітну і корисну

потужність генератора, якщо при робочій температурі опір кіл якоря $R_a=0,1$ Ом, збудження $R_f=460$ Ом.

14. На міських комунікаціях, при перевезенні пасажирів одночасно рухається 40 трамваїв і 60 тролейбусів. Для живлення трамвайно – тролейбусної контактної мережі з $U_n=550$ В використовується міська ТЕЦ з десятьма однаковими за потужністю генераторами постійного струму незалежного збудження, які працюють паралельно і однаково навантаженні. Нехтуючи втратами потужності в контактній мережі, необхідно визначити корисну потужність і струм якоря кожного генератора, якщо в середньому один трамвай споживає струм $I_1=100$ А, а тролейбус $I_2=120$ А.

15. Генератор постійного струму в номінальному режимі навантаження має $P_n=68$ кВт, $n_n=1470$ об/хв при $P_m=80$ кВт. Розрахувати потужність затрат машини, ККД генератора і момент на валу приводного двигуна при безпосередньому з'єднанні його з валом генератора.

16. Генератор паралельного збудження при $P_n=190$ кВт і $U_n=460$ В при робочій температурі має опір кола якоря $R_a=0,05$ Ом, кола збудження $R_f=92$ Ом. Механічні і магнітні втрати в генераторі, відповідно, дорівнюють $\Delta P_{мех}=1,2$ кВт, $\Delta P_{мг}=1,5$ кВт. Визначити величини струмів якоря і збудження, постійних, змінних і сумарних втрат потужності в генераторі, номінальний ККД.

17. Генератор постійного струму незалежного збудження в номінальному режимі при $U_n=115$ В має опір кола якоря $R_a=0,115$ Ом. Визначити ЕРС генератора, корисну і електромагнітну потужність генератора, якщо номінальна зміна напруги $\Delta U_n=10\%$.

18. Чотириполюсний шунтовий генератор в номінальному режимі навантаження має $P_n=23$ кВт, $U_n=230$ В, $n_n=1460$ об/хв, опір кіл якоря $R_a=0,2$ Ом, збудження $R_f=115$ Ом, $C_n=50$ (обмотковий коефіцієнт). Обчислити ЕРС генератора, магнітний потік в зазорі і електромагнітний гальмівний момент.

19. Для номінального режиму генератора незалежного збудження визначити струм навантаження, ЕРС обмотки якоря і втрати потужності в колі якоря, якщо номінальна потужність генератора $P_n=1200$ кВт, $U_n=750$ В і опори обмоток при робочій температурі якоря $R_a=0,006$ Ом, додаткових полюсів $R_{дп}=0,001$ Ом.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

МЕТА РОБОТИ: вивчити будову двигуна постійного струму, опанувати способи запуску, зміни напрямку обертання якоря і регулювання його частоти обертання; дослідним шляхом отримати механічну і робочі характеристики двигуна.

15.1. Програма роботи

15.1.1. Ознайомитись з обладнанням, приладами і апаратами дослідної установки, записати їх технічні дані в протокол випробувань.

15.1.2. Скласти схему установки для випробувань двигуна постійного струму і паралельного збудження (рис. 15.1.).

15.1.3. Повністю ввести реостат R_z , який регулює запуск, в коло якоря, вивести повністю реостат R_p в колі збудження і відключити всі резистори навантаженого реостата R_n .

15.1.4. Запустити двигун, для чого ввімкнути автомат В і поступово вивести пусковий реостат R_d . При розгоні двигуна слідкувати, щоб струм в колі якоря не перевищував номінальний понад 1,5 - 2 рази.

15.1.5. Змінити напрям обертання якоря двигуна. З цією метою вимкнути двигун від джерела живлення постійної напруги, встановити ручку реостата, який регулює запуск, у вихідне положення, поміняти місцями проводи, що приєднані до затискачів якоря або до затискачів обмотки збудження. Потім виконати запуск двигуна, згідно з методикою, викладеною в п. 15.1.4.

15.1.6. Перевірити, чи збуджений навантажувальний генератор. Якщо після розгону двигуна генератор не збуджується, вжити заходів для його збудження.

15.1.7. При х.х. двигуна дослідити вплив струму збудження на частоту обертання якоря. Плавно зменшуючи струм збудження з допомогою регульовального реостата R_p , збільшувати обертання якоря до величини, яка не перевищує $1,5n_n$.

Результати вимірювань занести в таблицю 15.1.

Таблиця 15.1

| Струм збудження I_z, A | Частота обертання якоря $n, об/хв$ | Напруга на затискачах якоря U, B |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | |

15.1.8. Дослідити вплив напруги на затискачах якоря на частоту обертання навантаженого двигуна. З цією метою реостатом R_d встановити різні напруги і з допомогою тахометра виміряти частоту обертання вала машини. Струм збудження двигуна протягом досліду повинен за допомогою реостата R_d підтримуватись незмінним і рівним номінальному.

Результати вимірювань занести в таблицю 15.2.

Таблиця 15.2

| Напруга на затискачах двигуна U, B | Струм якоря двигуна $I_a,$ A | Струм збудження I_p, A | Частота обертання якоря $n, об/хв$ |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| | | | |

15.1.9. Випробувати двигун в режимі навантаження, для чого реостатами R_p і R_d встановити і підтримати протягом всього досліду напругу на загисках якоря і струм збудження незамкнутими і рівними їх номінальним значенням i , змінюючи кількість ввімкнених резисторів навантажувального реостата R_n , випробувати двигун при струмах, що не перевищують $1,2I_{ном}$ ($I_{ном}$ -- номінальний струм двигуна).

Результати вимірювань записати в таблицю 15.3.

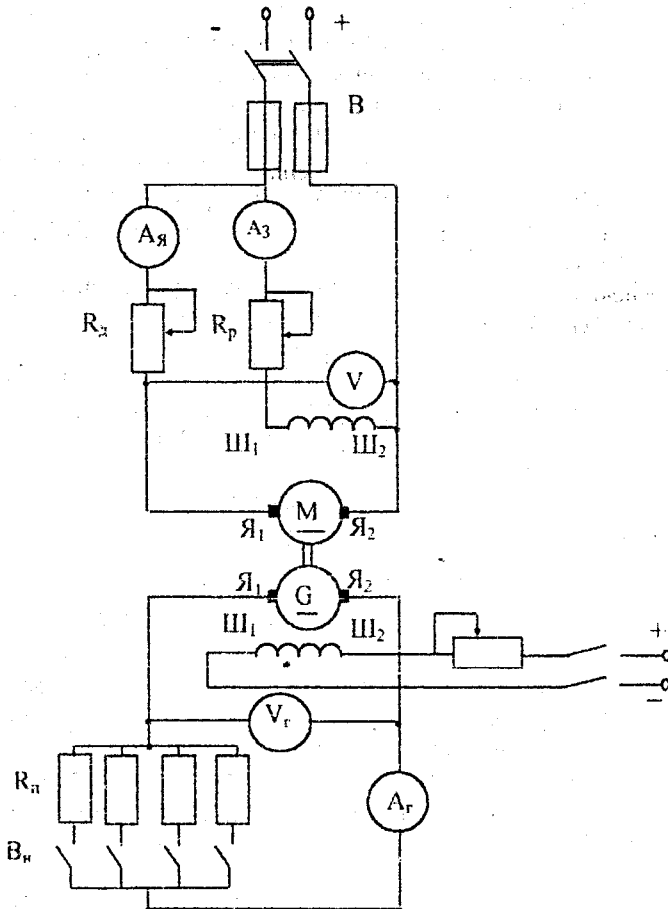


Рисунок 15.1

15.1.10. Побудувати в одній системі координат криву $n = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, а в другій – криву $n = f(U)$ при $I_a = \text{const}$.

Оцінити можливий діапазон та економічність регулювання частоти обертання двигуна цими способами.

15.1.11. Розрахувати для дослідів навантаження двигуна такі величини: потужність P_1 і P_2 , обертальний момент M і ККД.

Результати обчислень записати в таблицю 15.3.

Таблиця 15.3

| Виміряно | | | | Розраховано | | | | | | |
|----------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|----------------|---------------------|-------------------|--------|---|
| U, В | I _я , А | I _з , А | n, об/хв | U _г , В | I _г , А | η _г | P ₁ , Вт | P ₂ Вт | M, Н·м | η |
| | | | | | | | | | | |

15.1.12. Побудувати в одній системі координат механічну характеристику $n = f(M)$ двигуна постійного струму паралельного збудження, а в другій - його робочі характеристики n , M , I_a , $\eta = f(P)$.

15.1.13. Зробити висновки про робочі властивості двигунів постійного струму.

15.2 Програма домашньої підготовки до виконання лабораторної роботи

15.2.1. Повторити теоретичний матеріал: конструкцію і принцип дії двигуна постійного струму, рівняння електричного стану, способи запуску, регулювання частоти обертання і способу реверсу.

15.2.2. Підготувати протокол випробувань за схемами лабораторних установок і таблицями для внесення результатів дослідів.

15.2.3. Скласти перелік операцій і вказати необхідну послідовність їх виконання для здійснення запуску двигуна.

15.2.4. Розрахувати, яким би був пусковий струм, якщо запуск двигуна здійснювався б без пускового реостата. Визначити опір пускового реостата для обмеження пускового струму $I_{тек}$ до величини $\leq 2I_{ном}$.

15.2.5. Накреслити наближений вид характеристик: $n = f(I_b)$ при $U = \text{const}$, робочих M , I_a , $\eta = f(P_2)$.

15.3. Основні теоретичні відомості

Конструкцією двигун постійного струму нічим не відрізняється від генератора.

Двигун постійного струму, обмотка збудження якого прислана паралельно до яірної обмотки, називається двигуном паралельного збудження. В результаті взаємодії струму якоря I_a із основним магнітним потоком Φ утворюється електромагнітний обертальний момент:

$$M = C_m I_a \Phi, \text{ де}$$

C_m - постійний для даної машини коефіцієнт.

При обертанні якоря в магнітному полі в його обмотці індукуються ЕРС, яка пропорційна частоті обертання якоря n і магнітному потоку машини Φ :

$$E = C_E n \Phi, \text{ де}$$

C_E - постійний для даної машини коефіцієнт.

Напруга джерела, що прикладена до затискачів якоря двигуна, врівноважується ЕРС і спадом напруги в колі якоря:

$$U = E + R_A I_A$$

При роботі двигуна з номінальною швидкістю $E \approx 0,95 U$. На початку запуску двигуна, частота обертання якоря, а відповідно і ЕРС, рівні нулю. Якщо двигун ввімкнути на напругу мережі, тобто без додаткового опору, то пусковий струм якоря буде в 10 – 50 разів перевищувати номінальний:

$$I_A = \frac{U - E}{R_A} = \frac{U - 0}{R_A} = (10 \dots 50) I_{Aн}$$

Для зменшення пускового струму послідовно з якорем вмикають реостат R_{ω} , який регулює запуск. В момент запуску він повинен бути повністю виведений. Звичайно, опір пускового реостата вибирається таким, щоб пусковий струм не перевищував двократного номінального.

З розгоном двигуна пропорційно частоті обертання збільшується ЕРС, в результаті чого зменшується струм якоря. Тому при збільшенні частоти обертання якоря опір пускового реостата поступово зменшують до нуля.

Частота обертання якоря двигуна:

$$n = \frac{U - R_A I_A}{C_E \Phi}$$

Із останнього виразу бачимо, що частоту обертання можна регулювати такими способами:

- ◆ зміною магнітного потоку Φ , регулюючи струм реостатом R_p (рис. 15.1.);
- ◆ зміною напруги, яка підводиться до затискачів якоря, при незмінному магнітному потоці;
- ◆ зміною опору якорного кола E_A .

Характеристика х.х. двигуна являє собою залежність частоти обертання якоря від струму збудження $n = f(I_b)$ при постійній номінальній напрузі на затискачах двигуна при $U = U_H = \text{const}$. Характеристика х.х. має гіперболічний вигляд (рис. 15.2.).

При великих струмах збудження через насичення магнітного ланцюга магнітний потік змінюється пропорційно струму збудження.

Тому спадна частина характеристики х.х. йде більш похило. Верхня частина цієї характеристики має більшу крутизну внаслідок того, що при малих насиченнях сильно виявляється розмагнічувальна дія якоря. Надмірне збільшення струму збудження або випадковий обрив кола збудження може викликати "розкид" двигуна, тобто надмірне збільшення частоти обертання до значень, небезпечних для механічної міцності якоря.

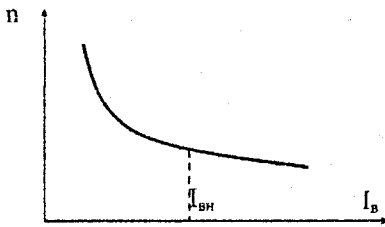


Рисунок.15.2

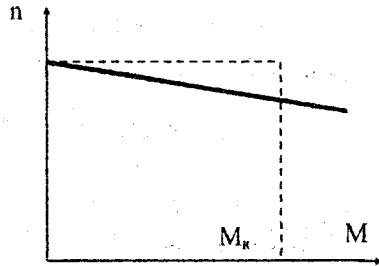


Рисунок.15.3

Механічна характеристика являє собою залежність частоти обертання двигуна від навантаження на валу $n(M)$:

$$n = \frac{U}{C_L \Phi} - M \frac{R_g}{C_E C_M \Phi^2}$$

При збільшенні механічного навантаження на валу двигуна частота його обертання несуттєво зменшується (рис. 15.3.).

Властивості двигуна постійного струму характеризуються його робочими характеристиками $M(P_2)$, $I_a(P_2)$, $\eta(P_2)$, які отримують при $U=U_H=const$ і струмі збудження $I_b=const$. Наближений вигляд цих характеристик зображено на рис. 15.4.

15.4 Опис лабораторного стенда

Лабораторний стенд (див. рис. 15.1.) для дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням складається з двох

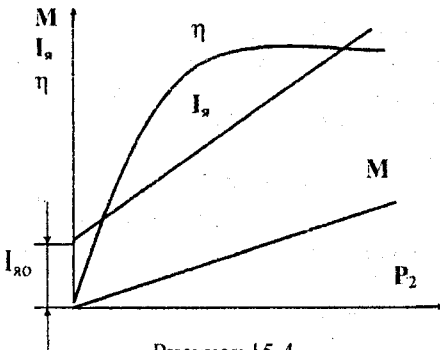


Рисунок.15.4

однакових машин, з'єднаних муфтою. Машину M використовують як дослідний двигун, а машина G служить навантаженим генератором. В колі якоря дослідного двигуна включений реостат R_d , що регулює запуск і за допомогою якого здійснюється запуск двигуна в хід і зміна напруги на його затискачах. Струм збудження двигуна може змінюватись за допомогою реостата R_p .

Навантаження на валу двигуна здійснюється з допомогою генератора G , опір якорного кола якого регулюється з допомогою реостата R_p . Потужність, яка споживається двигуном в мережі і потужність генератора

визначають за показанням приладів, що включені в колах двигуна та генератора.

Частоту обертання двигуна визначають за допомогою тахометра.

15.5 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Перед вмиканням до мережі двигуна, що випробовується, необхідно повністю ввести реостат R_p , що регулює запуск в колі якоря, повністю вивести регульовальний реостат в колі збудження двигуна і вимкнути вимикач В1 в колі збудження навантаженого генератора.

З допомогою автоматичного вимикача В двигун увімкнати до мережі постійного струму. Із розгоном двигуна плавно зменшують опір пускового реостата так, щоб струм в обмотці якоря не перевищував $1,5I_a$.

Для реверсу двигуна необхідно вимкнути його з мережі та поміняти полярність напруги або на обмотці якоря, або на обмотці збудження.

При наступному запуску обов'язково переконатись, що пусковий реостат повністю виведено.

Характеристика х.х. $p(I_a)$ змінюється таким чином. За допомогою реостата R_p плавно зменшують струм збудження доти, доки швидкість не стане рівною $1,5n_d$. Результати спостереження заносять в таблицю 15.1.

При випробовуванні двигуна в режимі навантаження на х.х. з допомогою реостата R_p встановлюють максимальний струм збудження двигуна. Вмикають напругу збудження навантаженого генератора. Змінюючи число ввімкнених резисторів у колі якоря генератора, випробовують двигун при таких значеннях струму якоря $I_a=0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ і $1,2I_a$. Результати досліду заносять до таблиці 15.3. Потужність, що споживається двигуном із мережі, визначають за формулою:

$$P_1 = U(I_a + I_z)$$

де U - напруга живлення двигуна;

I_a, I_z — відповідно струм якоря і струм обмотки збудження.

Потужність P_2 на валу двигуна визначають методом навантаженого генератора. Змінюючи потужність генератора $P_g = I_g U_g$, що працює при напрузі U_g і струмі I_g і знаючи його ККД, для різних навантажень визначають потужність на валу двигуна:

$$P_2 = P_g / \eta,$$

де η - ККД навантаженого генератора, при встановленому режимі роботи (визначається з характеристики, яка приведена на передній панелі стенду).

Момент двигуна, Нм $M = 9550 \frac{P_2}{n}$

де P_2 - потужність на валу двигуна, кВт;

n - частота обертання якоря, об/хв.

ККД дослідного двигуна знаходять за формулою: $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

15.6 Завдання на підготовку до лабораторно-практичного заняття

1. Повторити теоретичний матеріал: принцип дії і будову двигуна постійного струму, рівняння швидкісної і механічної характеристик, способи пуску і регулювання частоти обертання, робочі характеристики [1. с. 332-376; 2. с. 389-408]

2. Розв'язати задачі, запропоновані викладачем, які надані нижче.

3. Вивчити методику зняття робочих характеристик.

4. Підготувати в робочому зошиті протокол робочих випробувань двигуна паралельного збудження.

15.7 Питання для самоконтролю і задачі для самостійного розв'язування

1. Принцип роботи машини постійного струму в ролі двигуна. Яка роль електромагнітного моменту і ЕРС в цих режимах?

2. Напишіть формули, які характеризують роботу двигуна постійного струму.

3. Зобразіть схеми двигунів незалежного, паралельного і змішаного збудження, вкажіть на них напрямки струмів і ЕРС.

4. Виведіть рівняння механічної характеристики двигуна постійного струму.

5. На прикладі двигуна паралельного збудження поясніть фізичні процеси і особливості пуску в хід двигуна постійного струму.

6. Зобразіть і поясніть механічні характеристики двигунів паралельного збудження.

7. В якому випадку і чому можливий рознос двигуна паралельного збудження?

8. Перерахуйте способи регулювання частоти обертання двигунів паралельного збудження.

9. Перерахуйте і поясніть гальмівні режими двигуна паралельного збудження.

10. Для приводу металорізального верстата використовується двигун постійного струму паралельного збудження з номінальними величинами: $P_n = 4,5 \text{ кВт}$, $U_n = 220 \text{ В}$, $\eta_n = 80\%$. Зобразити принципову електричну схему двигуна і розрахувати номінальний струм в колі якоря, якщо номінальний струм збудження складає 5% від струму, який споживається у колі струму.

11. Для приводу водяного насоса використовується двигун паралельного збудження з номінальними величинами: $P_n = 40 \text{ кВт}$, $U_n = 110 \text{ В}$, $\eta_n = 0,8$. При температурі 20°C опір кін якоря $R_n = 0,01 \text{ Ом}$, збудження $R_z = 11 \text{ Ом}$. Розрахувати кратності пускового струму якоря при прямому (безреостатному) способі пуску двигуна.

12. Шунтовий двигун, який приводить в обертання токарний верстат в номінальному навантаженні при живленні від мережі з $U_n = 110 \text{ В}$, споживає

струм $I_n=36\text{A}$ і обертається з частотою $n_n=1450$ об/хв. Опір при робочій температурі кіл якоря $R_a=0,15$ Ом і збудження $R_z=55$ Ом. При обробці деталі з м'якого матеріалу токарь вирішив підвищити швидкість її обробки. З цією метою він підвищив частоту обертання двигуна, зменшивши його основний магнітний потік на 30% відносно номінального. Необхідно визначити на скільки відсотків відносно номінальної підвищилась швидкість обробки деталі при незмінних M_c і I_a .

13. Двигун паралельного збудження при живленні від мережі з $U_n=220\text{В}$ споживає струм $I_n=80\text{A}$ і обертається з $n_n=1000$ об/хв, при цьому $R_a=0,10$ Ом, $R_z=110$ Ом. Визначити частоту обертання двигуна при холостому ході і відсоткову зміну частоти обертання при переході двигуна з режиму номінального навантаження в режим холостого ходу.

14. Двигун незалежного збудження при живленні від мережі з $U_n=220\text{В}$ споживає потужність $P_{1n}=22\text{кВт}$. При цьому спад напруги в його якорному колі складає $\Delta U=5\%$. Визначити проти-ЕРС обмотки якоря, втрати потужності в колі якоря і електромагнітну потужність двигуна.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ ДВИГУНОМ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕВЕРСИВНОГО МАГНІТНОГО ПУСКАЧА

МЕТА РОБОТИ: ознайомитись з схемою дистанційного керування асинхронним двигуном, конструкцією та принципом дії електричних апаратів цієї схеми, призначення захисту у схемі, складання схеми дистанційного керування.

16.1 Програма роботи

16.1.1. Ознайомитись з будовою реверсивного магнітного пускача і його окремими елементами, контактами, втягувальною котушкою, магнітною системою.

16.1.2. Занотувати в зошит паспортні дані пускача.

16.1.3. Скласти електричний ланцюг відповідно до схеми (рис. 16.1.)

16.1.4. Після перевірки схеми керівником виконати: запуск і зупинку двигуна у напрямку "Вперед"; запуск і зупинку двигуна у напрямку "Назад".

16.1.5. Перевірити дію електричного і механічного блокування на працюючому двигуні одночасним натисканням на кнопки "Пуск", "Вперед" і "Пуск", "Назад" без попередньої зупинки його кнопкою стоп.

16.1.6. Вдруге запустити двигун, попередньо відсиднавши блок-контакти, що шунтують кнопку "Пуск" "Вперед". Виявити призначення цих контактів.

16.1.7. Описати роботу схеми керування запуском двигуна.

16.1.8. Описати у звіті дію блокування в схемі керування двигуном.

16.1.9. Описати призначення блок-контактів, що шунтують пускові кнопки.

16.1.10 Описати роботу елементів захисту електродвигуна.

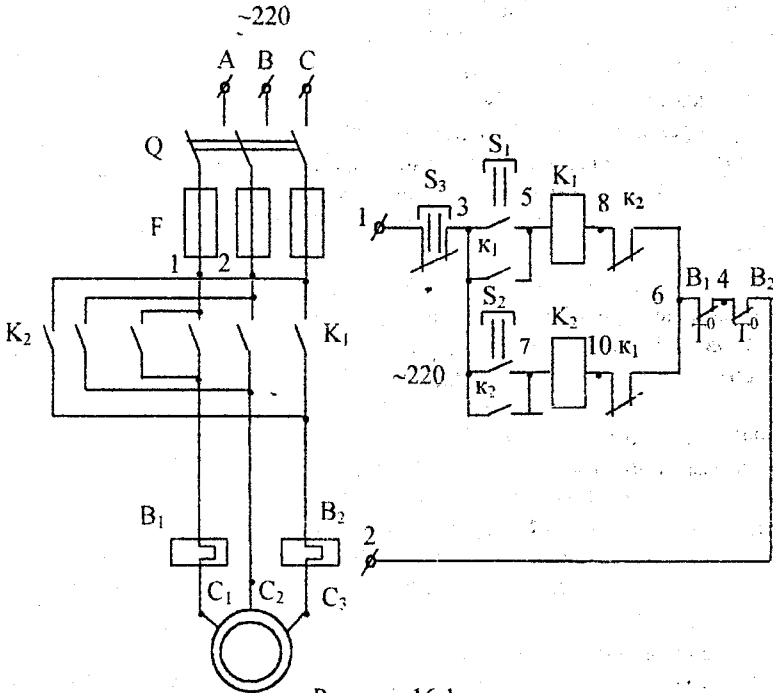


Рисунок 16.1

16.2 Завдання для домашньої підготовки до проведення лабораторної роботи

16.2.1. Ознайомитись згідно з [1 - 3] з розділами курсу: електричні апарати 1 - §17 - 3, с.403; §17 - 4, с.403; §17 - 5, с.

404; §17 - 12, с.411

2 - §17-6, с. 423-425

3 - §24-1, с. 529-531

керування асинхронними двигунами

1 - §18-4, с.429

2 - §17-6, с. 425

3 - §24 - 2, с. 537 - 543

16.3 Основні теоретичні відомості

Дистанційне керування асинхронним двигуном дозволяє проводити запуск, зупинку, реверс двигуна з одного або декількох постів керування.

Найпростіші схеми дистанційного керування складаються на основі використання нереверсивних або реверсивних магнітних пускачів. Перші проводять запуск і роботу (обертання) електродвигуна в одному напрямі, другі -- як в одному так і в зворотному йому напрямках.

Нереверсивний магнітний пускач складається з одного триполюсного контакту, двох теплових реле і двокнопкової станції. Контактор і реле поміщені в металевому кожусі, кнопкова станція встановлюється на щиті керування або поблизу технологічної устаткування, яка приводиться в дію електродвигуном.

Реверсивний магнітний пускач має два триполюсних контактори, два теплових реле і трикнопову станцію керування.

Основними частинами електричного контактора є електромагніт і контактна система. Остання складається з рухомих контактів.

У триполюсному контакторі в загальному випадку є три силових замикальних контакти, розділених один від одного ізоляційними і дугогасними проміжками (для попередження дво- та трифазових коротких замикань), а також допоміжні замикаючі або розмикаючі контакти - блок-контакти (для виконання схемних блокувань та допоміжних перемикачів).

Електромагніт складається з двох Ш-подібних феромагнітних осердь, на одне з яких (нерухоме) насаджено котушку, а з другим (рухомих) конструктивно зв'язані рухомі частини контактів і блок-контактів.

При пропусканні електричного струму по колу котушки (у випадку замикання контактів кнопки керування "Пуск" від натискання на останню руки оператора) в осердях виникає магнітний потік, який притягує рухоме осердя до нерухомого. При цьому рухомі частини контактів замикаються з нерухомими.

Якщо прислати до нерухомих частин силових контактів проводи від трифазної мережі, а до рухомих - проводи, що йдуть від обмотки асинхронного двигуна, то при спрацюванні контактора буде виконано дистанційне (напівавтоматичне) керування запуском двигуна.

Для захисту електродвигуна від аварійних режимів (коротких замикань між фазами в силовому колі між двома якими-небудь фазними обмотками двигуна, а також перегріву обмоток останнього понад допустимі температури) використовують відповідно запобіжники й теплові реле. Запобіжники встановлюють у силове коло перед нерухомими частинами силових контактів, а теплове реле - після рухомих частин контактів.

Теплові реле використовуються для захисту електродвигуна від тривалих струмових перенавантажень (невідчутних для запобіжників) і вмикаються в дві фази силового кола магнітного пускача.

При проходженні через елемент нагрівання теплового реле продовж однієї години струму перевантаження, що перевищує номінальний струм двигуна на 30%, реле розмикає коло котушки контактора своїми розімкненими блок-контактами, вимикаючи двигун з мережі.

На рис. 16.1. подано принципову електричну схему керування асинхронним двигуном за допомогою реверсивного магнітного пускача.

У схемі ввімкнені такі електричні апарати та їх елементи:

Q - вмикач триполюсний;

F - запобіжники;

K₁, K₂ - силові замикачі (нормально відкриті) контакти магнітних пускачів;

B₁, B₂ - нагрівальні елементи теплових реле;

M - електродвигун;

S₃ - кнопка "Стоп";

S₁, S₂ - кнопки "Пуск"

K₁, K₂ - втягувальні котушки магнітних пускачів;

K₁, K₂ - розмикальні (нормально закриті) блок-контакти магнітних пускачів;

B₁, B₂ - розмикаючі (нормально закриті) блок-контакти теплових реле.

Електричне коло "мережа-обмотка" електродвигуна C₁, C₂, C₃ називається силовим колом; електричне коло, до якого входять кнопки керування S₁, S₂, S₃, втягувальні котушки K₁, K₂ і т.д., називають колом керування.

Електрична апаратура, що належить до силового кола та кола управління, має таке призначення.

Вмикач Q використовується у колі як для подачі, так і для зняття напруги з усіх елементів електричного кола, наприклад, при огляді та ремонтах.

Запобіжники F призначені для захисту електродвигуна від струму КЗ. Вони не повинні перегорати при запуску двигуна, отже вибираються з урахуванням найбільшого пускового струму двигуна.

Теплові реле B призначені для захисту двигуна від тривалих струмових навантажень.

В промислових силових установках дуже часто замість вмикача, запобіжників, теплових реле встановлюють один апарат, який називається автоматом. Він конструктивно складається з трьох вказаних пристроїв.

Контактори K магнітного пускача служать для часткових вмикань і вмикань під навантаженням силового кола. Керування контакторами K здійснюється дистанційно за допомогою кнопок.

При замиканні кола керування кнопкою "Пуск" S₁ через котушку контактора K₁ проходить струм.

Електромагніт притягує рухомий якір, замикаючи при цьому силові контакти K₁, блок-контакт k₁, ввімкнені паралельно кнопці "Пуск" S₁, і розмикальний блок-контакт k₁, ввімкнений послідовно з котушкою контактора K₂;

В результаті вмикання контактора K_1 напруга мережі підводиться до обмотки електродвигуна, і останній починає обертатись в напрямі "Вперед".

Через блок-контакт K_1 , підключена паралельно кнопка "Пуск" S_1 , відбувається "саможивлення" котушки контактора після того, як оператор перестає натискати на кнопку і остання повертається під дією пружини у своє попереднє відкрите положення.

Через блок-контакт k_1 , який підключений послідовно з котушкою котнактора K_2 , здійснюється електричне блокування, яке не допускає одночасного вмикання контактів K_1 і K_2 : одночасне вмикання контактів K_1 і K_2 у силовому колі викличе КЗ між двома фазами мережі. Слід зауважити, що у конструкції реверсивного магнітного пускача передбачено також наявність механічного блокування, що не дозволяє одночасного втягування котушок контактів K_1 і K_2 . При замиканні кола-керування кнопкою "СТОП" S_3 , котушка контакта K_1 втрачає живлення, якір під дією ваги (або пружини) відпадає, силові контакти K_1 розмикаються, електродвигун зупиняється.

Наступний запуск двигуна у напрямку "Вперед" можливий тільки після натиску на кнопку "Пуск" S_1 . Таке блокування вмикання контакта K_1 (через блок-контакт k_1 , що замикається) з кнопкою "Пуск" S_1 , дає змогу здійснити захист від зникнення або різкого пониження напруги мережі (нульовий захист). Відключившись, електродвигун уже не може самочинно включитись при неочікуваній появі напруги в мережі, тобто самозапуска двигуна не відбудеться. Вказано захід, що є необхідним для безпечного керування механізмами.

При керуванні запуском двигуна в напрямі "Назад" електрична схема працює аналогічно.

16.4 Опис лабораторного стенда

На лабораторному стенді установлений реверсивний магнітний пускач типу ПМЕ - 113. Номінальні дані пускача: допустима напруга на силових контактах - 500В; напруга втягувальної котушки - 127В; допустима потужність двигуна, що запускається -- 4 кВт.

На панель стенду виведені затискачі котушок, силових контактів, блок-контактів. Також на панелі встановлена триштіфтова кнопкова станція типу КУ-121-3 і теплове реле типу ТРН-25У3 і виведені їхні контакти.

16.5 Завдання на підготовку до лабораторно-практичного заняття

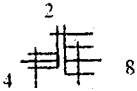
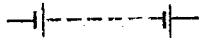
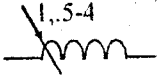

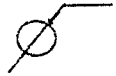



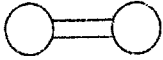


Перед виконанням лабораторної роботи рекомендується ознайомитись з теоретичними відомостями, які приведені в дійсних методичних вказівках і в [3, с. 413-430].

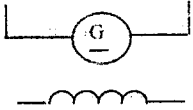
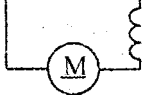
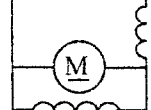





Підготувати протокол досліду.


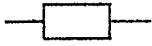
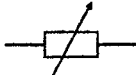




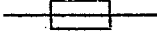
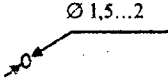

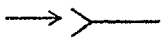
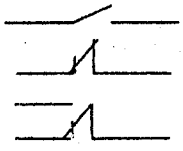
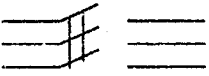
16. 6 Питання для самоконтролю




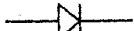
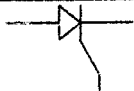

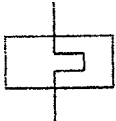
1. Перерахувати апарати, які застосовують для ручного управління електроприводами.
2. Перерахувати апарати, які застосовують для дистанційного керування електроприводами з одного або декількох постів управління.
3. Поясніть будову та принцип дії контактора.
4. Поясніть будову та принцип дії магнітного пускача.
5. Назвіть різницю між контактором і магнітним пускачем.
6. Як здійснюється блокування в реверсивних магнітних пускачах?
7. Як здійснюється “саможивлення” втягувальних катушок пускача?
8. Пояснити принципову відміну між ручною і автоматичною системою керування електроприводами.
9. Назвати якими апаратами здійснюється захист електроприводів від струмів короткого замикання.
10. Якими апаратами здійснюється захист електроприводів від навантаження?
11. В чому полягає принцип керування електроприводами металорізальних верстатів в функції шляху, навантаження, швидкості, часу?

УМОВНІ ГРАФІЧНІ ПОЗНАЧЕННЯ У ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМАХ

| | |
|---|---|
| Елемент гальванічний |  |
| Батарея із гальванічних елементів |  |
| Обмотка паралельного збудження |  |
| Обмотка послідовного збудження |  |
| Статор електричної машини Загальне позначення |  |
| Ротор електричної машини Загальне позначення |  |
| Коротко замкнений ротор Щітка на колекторі <u>Примітка.</u> Щітки зображують лише при необхідності |  |
| Електрична машина |  |
| Машини, що зв'язані механічно |  |
| Генератор постійного струму Загальне позначення |  |
| Двигун постійного струму Загальне позначення |  |

| | |
|---|---|
| <p>Генератор (G) або двигун (M) постійного струму з незалежним збудженням</p> |  |
| <p>Генератор (G) або двигун (M) постійного струму з паралельним збудженням</p> |  |
| <p>Генератор (G) або двигун (M) постійного струму із послідовним збудженням</p> |  |
| <p>Генератор (G) або двигун (M) постійного струму із змішаним збудженням</p> |  |
| <p>Генератор змінного струму</p> |  |
| <p>Двигун змінного струму</p> |  |
| <p>Генератор синхронний Загальне позначення</p> |  |
| <p>Двигун синхронний Загальне позначення</p> |  |
| <p>Двигун асинхронний з короткозамкнутим ротором Загальне позначення</p> |  |
| <p>Двигун асинхронний з фазним ротором Загальне позначення</p> |  |

| | |
|---|---|
| Котушка електромеханічного пристрою |  |
| Резистор постійний |  |
| Резистор змінний |  |
| Конденсатор постійної ємності |  |
| Конденсатор змінної ємності |  |
| Лампа розжарювання |  |
| Електронагрівач |  |
| Запобіжник плавкий |  |
| Контакт замикаючий |  |
| Контакти розмикаючі |  |
| З'єднання контактне роз'ємне |  |
| Контакти комутуючого пристрою: замикальні розмикальні перемикальні |  |
| Вимикач триполосний |  |

| | |
|--|---|
| Прилад вимірювальний: показовий фіксувальний інтегровальний |  |
| Трансформатор силовий |  |
| Гальмо |  |
| Діод |  |
| Теристор з керуванням по катоду |  |
| Транзистор типу р-п-р |  |
| Сприймальна частина теплового реле |  |

ЛІТЕРАТУРА

1. Іванов А.А. Електротехніка. Лабораторні роботи – Київ: Вищ. шк 1982 р.
2. Касаткін А.С. Електротехніка.- М.:Енергія, 1974
3. Касаткін Л.С., Немцов М.В. Електротехніка.- М.: Енергоатомвидав, 1983
4. Загальна електротехніка /Під ред. Л.Т, Блажкіна- Л.: Енергія, 1979
5. Електротехніка /Під ред. В.С. Пантошина. - М.: Вищ. шк. 1976
6. Електротехніка /Під ред. В.Г. Герасимова. - М.: Вищ. шк. 1983
7. Електротехніка /Під ред. В.Г. Григор'єва. - М.: Вищ. шк. 1983

Навчальне видання

В.І. Нагул, В.С. Ткач, Е.Я.Блінкін

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
(розділ "Електричні машини")

Лабораторний практикум

Оригінал-макет підготовлено Ткач В.С.

Редактор В.О.Дружиніна

Коректор З.В. Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку *12.12.03р.*
Формат 29, 7x42 ¼
Друк різнографічний
Тираж *80* прим.
Зам. № *2003-168*

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк. *344*

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ