

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ І ТРАНСФОРМАТОРИ**

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
по електричним машинам

*У трьох частинах
Частина 1*

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв • НУК • 2018

Автори: С. Ю. Александровський, старший викладач кафедри СЕЕС;
С. І. Бандура, старший викладач кафедри СЕЕС;
С. М. Новогрецький, кандидат технічних наук, доцент кафедри СЕЕС;
В. І. Подимака, кандидат технічних наук, доцент кафедри СЕЕС;
Р. А. Ставинський, кандидат технічних наук, доцент кафедри СЕЕС

Рецензент Д. О. Жук, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електричні машини постійного струму і трансформатори : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт по електричним машинам в трьох частинах. Частина 1 / С. Ю. Александровський, І. С. Бандура, С. М. Новогрецький, В. І. Подимака, Р. А. Ставинський. – Миколаїв : НУК, 2018. – 00 с.

Досліджуються генератори та двигуни постійного струму і трифазні трансформатори. Наведені основні аналітичні співвідношення та надані методичні вказівки щодо побудови характеристик, які пояснюють властивості електричних машин у основних режимах роботи. Призначено для студентів Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки НУК при вивченні дисципліни "Електричні машини".

УДК 621.31(076)

ВСТУП

Найбільш розповсюджений спосіб приводу механізмів та пристроїв в електромеханічних системах автоматики, транспортних електричних системах і комплексах – це привід за допомогою електричних машин.

Машини постійного струму набули поширення завдяки своїм характеристикам та можливостям: по-перше, як силові привідні двигуни з різноманітними механічними характеристиками; по-друге, як тандем приводу "генератор-двигун" з широкими можливостями щодо керування, по-третє, як електричні привідні двигуни автономних систем з електроенергетичною системою постійного струму та ін. Трансформатори застосовуються в електроенергетиці для перетворення та передачі електроенергії, для електричної розв'язки кіл в електросхемах, узгодження мережі та вентилів, у системах зварювання, у вимірювальній техніці для розширення діапазону вимірів.

Методичні вказівки дають можливість вивчити роботу трансформаторів і машин постійного струму різноманітних типів збудження в режимах генераторів та двигунів, а також отримати досконалі знання про електромагнітні процеси, які протікають у зазначених вище перетворювачах енергії.

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Для виконання лабораторних робіт студенти повинні пройти інструктаж із техніки безпеки.

Перед тим, як приступити до складання схеми студенти повинні ознайомитися з устаткуванням і записати паспортні дані електричних машин і апаратів. Перед складанням схеми необхідно переконатися, що всі автомати і рубильники на робочому місці відключені.

Студенти бригади повинні самостійно зібрати схему установки і пред'явити її викладачу для перевірки. Включати установку можна тільки з дозволу викладача. Всі зміни в схемі, що зв'язані з приєднанням проводів, повинні робитися при відключеному живленні і нерухомих машинах. Робота під напругою допускається тільки з дозволу викладача з застосуванням відповідних заходів безпеки.

По закінченні роботи бригада пред'являє викладачу для перевірки протокол іспитів. Схему можна розібрати після дозволу викладача. Якщо робота не буде виконана у встановлений розкладом термін, слід погодити з викладачем час додаткових занять. На чергове заняття кожний студент повинен надати звіт по попередній роботі. Звіт оформляється кожним студентом індивідуально. До одного зі звітів бригади прикладається протокол іспитів, підписаний викладачем.

Звіт слід оформляти окремо по кожній роботі. Він має містити: обсяг роботи; паспортні дані електричних машин; принципи електричні схеми з'єднань лабораторного устаткування для проведення досліджень; експериментальні дані, отримані у ході лабораторних експериментів, і результати розрахунків у табличній формі з вказівкою одиниць вимірювання; графіки розрахункових та експериментальних залежно-

стей; розрахункові формули і короткі пояснення отриманих результатів; висновки по роботі.

Звіт має бути оформлений акуратно. Принципові електричні схеми у звіті повинні відповідати вимогам МЕК щодо їх графічного виконання. Розрахункові й опорні точки на графіках експериментальних та теоретичних залежностей слід чітко позначати. Криві проводити поміж розрахунковими точками так, щоб відстань до них була мінімальна, а характер кривих відповідав теорії електричних машин. При побудові декількох графіків з одним аргументом для кожного проводиться своя вісь ординат з відповідним градуюванням.

Всі розрахунки повинні виконуватися в одиницях виміру СІ. По кожній характеристиці для однієї з точок повинний бути проведений типовий розрахунок. При виконанні великого числа однотипних розрахунків рекомендується використовувати ЕОМ.

Лабораторна робота № 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

1. Обсяг роботи

1.1. Зняти наступні характеристики: холостого ходу; навантажувальну; зовнішню; регульовальну; короткого замикання.

1.2. За даними експериментів холостого ходу і короткого замикання визначити коефіцієнт насичення та побудувати характеристичний трикутник. З його допомогою побудувати навантажувальну характеристику для номінального струму якоря і порівняти її з експериментальною.

1.3. За характеристикою холостого ходу і експериментальною навантажувальною характеристикою, що відповідає номінальному струму якоря, побудувати характеристичні трикутники, які враховують дію поперечної реакції якоря для напруг $U = 0,5U_n$, $U = 0,75U_n$, $U = U_n$ та $U = 1,2U_n$.

1.4. За допомогою характеристичного трикутника, який отримано для номінальної напруги з характеристик холостого ходу і навантажувальної, побудувати розрахункові зовнішню і регульовальну характеристики генератора та порівняти їх з експериментальними.

1.5. Визначити номінальні зміни напруги якоря і струму збудження генератора за експериментальними і розрахунковими зовнішньою і регульовальною характеристиками.

1.6. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

Для зняття характеристик генератора збирають схему, наведену на рис. 1.1.

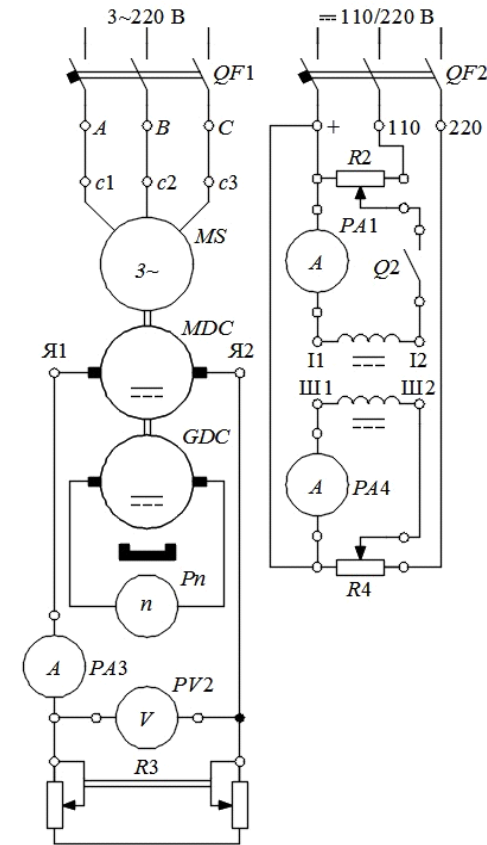


Рис. 1.1

2.1. Характеристика холостого ходу

Характеристика холостого ходу – це залежність напруги генератора від струму збудження $U = f(i_z)$ при струмі якоря $I_a = 0$ і постійній частоті обертання ($n = n_n = \text{const}$).

Зняття характеристики здійснюється в такому порядку: розмикають коло якоря генератора, для чого пластини навантажувального рідинного реостата R3 цілком виводять

з бака. Спочатку знімають висхідну гілку характеристики, збільшуючи струм збудження реостатом $R4$ від нульового значення до максимального $i_{3\max}$, що відповідає напрузі $U = (1,2 \dots 1,3)U_n$, записуючи значення напруги і струму збудження в табл. 1.1.

Потім знімають спадну гілку характеристики, зменшуючи струм збудження від $i_{3\max}$ до $i_3 = 0$. В обох випадках зміну струму збудження варто робити тільки в одному напрямку. Сталість частоті обертання забезпечується привідним синхронним двигуном MS , у якого вона строго фіксована.

Таблиця 1.1

№	i_3	U	$I_{\text{я}}$
	мА	В	А

2.2. Навантажувальна характеристика

Навантажувальна характеристика являє собою залежність $U = f(i_3)$ при постійному струмі якоря ($I_{\text{я}} = \text{const}$) і частоті обертання ($n = n_n = \text{const}$). Характеристику знімають для номінального струму якоря $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$ у наступному порядку: за допомогою реостатів $R3$ і $R4$ встановлюють точку с напругою $U = U_n$ і струмом $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$, потім, змінюючи струм збудження генератора, знижують напругу до мінімального значення, підтримуючи за допомогою навантажувального реостата $R3$ струм якоря незмінним. Дані експерименту заносять у табл. 1.1.

Точку навантажувальної характеристики, що відповідає нульовій напрузі, одержують із експерименту короткого замикання (КЗ).

2.3. Зовнішня характеристика.

Зовнішня характеристика – це залежність $U = f(I_{\text{я}})$ при $i_3 = \text{const}$ і $n = \text{const}$.

Характеристику знімають наступним чином. Спочатку встановлюють точку номінального режиму ($U = U_n, I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$), а струм збудження, що відповідає цьому режиму, приймають за номінальний та надалі зберігають незмінним. Потім за допомогою навантажувального реостата $R3$ змінюють струм якоря в межах від $I_{\text{я}} = (1,1 \dots 1,2) I_{\text{я}}$ до $I_{\text{я}} = 0$, обов'язково фіксуючи напругу при холостому ході U_0 . Дані експерименту заносять у табл. 1.1.

2.4. Регулювальна характеристика

Регулювальна характеристика – це залежність $i_3 = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_n = \text{const}$ і $n = n_n = \text{const}$.

Характеристику знімають у наступному порядку: при розімкненому колі якоря ($I_{\text{я}} = 0$) і номінальній частоті обертання ($n = n_n$) регулюванням збудження генератора встановлюють номінальну напругу, записуючи значення струму збудження i_{30} . Потім коло якоря замикають і генератор навантажують струмом в межах від $I_{\text{я}} = 0$ до $I_{\text{я}} = (1,1 \dots 1,2) I_{\text{я.н}}$, знімаючи висхідну гілку характеристики; при цьому напругу генератора підтримують незмінною регулюванням струму збудження. Спадну гілку регулювальної характеристики знімають, зменшуючи струм якоря від максимального до нуля. Дані експерименту заносять у табл. 1.1.

2.5. Характеристика короткого замикання

Характеристика короткого замикання являє собою залежність струму якоря від струму збудження $I_{\text{я.к}} = f(i_3)$ в режимі КЗ при $n = n_n = \text{const}$. Для зняття характеристики короткого замикання коло якоря генератора замикається накоротко через амперметр, для чого в схемі рис. 1.1 виводи навантажувального реостата $R3$ шунтуються перемичкою.

Увага! Режим короткого замикання небезпечний для генератора, і експеримент повинен здійснюватися при дуже малих значеннях струму збудження у порівнянні

з номінальним. Перед тим як запустити генератор у режимі КЗ, варто переконатися, що струм в обмотці збудження дорівнює нулю.

Запустивши генератор, плавним збільшенням струму збудження доводять струм у колі якоря генератора до значення $I_{я} = 1,2 I_{я.н}$, а потім, зменшуючи струм збудження до нуля, записують показання відповідних приладів в таблицю 1.1.

3. Обробка результатів випробувань

3.1. Вигляд характеристики холостого ходу показано на рис. 1.2, а.

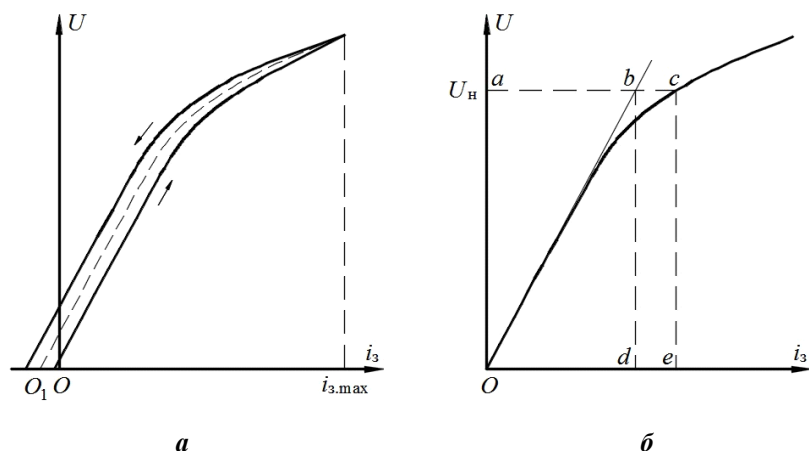


Рис. 1.2

Висхідна і спадна гілки характеристики різняться внаслідок гістерезису феромагнітних матеріалів, з яких виготовлена магнітна система генератора. За практичну характеристику холостого ходу приймають середню між висхідною і спадною гілками, яку приводять до початку координат шляхом зміщен-

ня її по осі абсцис до збігу точок O_1 та O . За практичною характеристикою холостого ходу визначають коефіцієнт насичення магнітної системи машини в номінальному режимі (див. рис. 1.2, б):

$$k_{\mu} = \frac{ac}{ab} = \frac{i_{3,e}}{i_{3,d}},$$

де відрізок $ab = Od$ еквівалентний струму збудження, необхідний для отримання номінальної напруги $U_{н}$ в ненасиченій магнітній системі (його визначають за дотичною Ob до початкової частини характеристики холостого ходу), а відрізок $ac = Oe$ – струм збудження, що відповідає тій же напрузі в магнітній системі з урахуванням насичення.

3.2. Характеристика КЗ генератора $I_{я.к} = f(i_3)$ близька до прямої, тому що при малих струмах збудження магнітна система не насичується і ЕРС $E \equiv i_3$, а струм якоря $I_{я.к} = E_{к} / R_{я}$.

У розмагніченій машині характеристика КЗ виходить з нульової точки (пунктирна лінія на рис. 1.3).

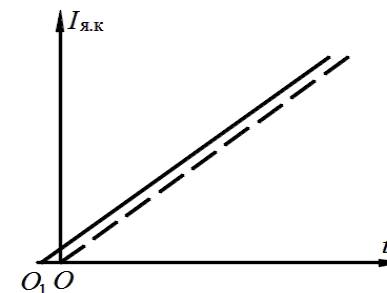


Рис. 1.3

У звичайних умовах експлуатації генератор не піддається розмагнічуванню, тому реальна характеристика КЗ проходить вище (суцільна лінія), тобто навіть при відсутності збудження виникають ЕРС і струм КЗ за рахунок залишкової намагніченості магнітної системи.

За допомогою характеристик короткого замикання і холостого ходу будують характеристичний трикутник генератора, який відображає вплив опору якорного кола і реакції якоря

на роботу генератора. Для його визначення будують в одній системі координат характеристики холостого ходу (пряма 1) і короткого замикання (пряма 2), продовжуючи їх до перетину на осі абсцис в точці O (рис.1.4).

Потім для номінального струму якоря $I_{я.к} = I_{я.н}$ за характеристикою КЗ визначають на осі абсцис відрізок $OC = i_{3.к}$,

що виражає повну силу намагнічування (НС) збудження (у масштабі струму збудження), яка необхідна для створення ЕРС E_k і компенсації реакції якоря.

Знаючи опір якорного кола $R_{я}$, знаходять $E_k = I_{я.н} R_{я}$ та з точки C паралельно осі ординат відкладають відрізок $BC = E_k$. Через точку B

паралельно осі абсцис проводять пряму до перетину з характеристикою холостого ходу у точці A . Відповідний цій точці струм збудження $i_{3.е} = OD$ визначає величину НС збудження, яка необхідна для створення E_k . Тоді відрізок $DC = AB$ дасть величину НС реакції якоря $i_{3.я}$ у масштабі струму збудження. Трикутник ABC це і є характеристичний трикутник генератора, катет BC якого виражає спад напруги в якорному колі, а катет AB – НС реакції якоря.

Оскільки в експерименті КЗ магнітна система машини не насичена, поперечна реакція якоря практично не впливає на роботу машини. Тому катет AB трикутника визначається тільки подовжньою реакцією якоря, дія якої залежить від положення щіток. Якщо щітки знаходяться в нейтралі, подовжня реакція якоря відсутня, і катет AB вироджується в точку (трикут-

ник стає просто вертикальним відрізком BC). При зсуві щіток із нейтралі в напрямку обертання якоря подовжня реакція якоря буде такою, що розмагнічує ($i_{3.к} > i_{3.е}$). При зсуві щіток в іншу сторону реакція якоря намагнічуюча, і катет AB повертається вправо від відрізка BC (рис.1.4).

3.3. При навантаженні генератора напруга на його зажимах визначається рівнянням ЕРС

$$U = E - I_{я} R_{я},$$

де $R_{я}$ – повний опір кола якоря генератора з урахуванням опору щіткового контакту в нагрітому стані (приведене до стандартної температури 75 °С). Таким чином, навантажувальна характеристика (суцільна лінія на рис. 1.5) відрізняється від характеристики холостого ходу внаслідок падіння напруги в колі якоря і дії реакції якоря. В залежності від характеру дії реакції якоря навантажувальна характеристика може проходити нижче характеристики холостого ходу (при розмагнічуючій реакції) або вище її (при намагнічуючій реакції). Як правило, реакція якоря носить розмагнічуючий характер.

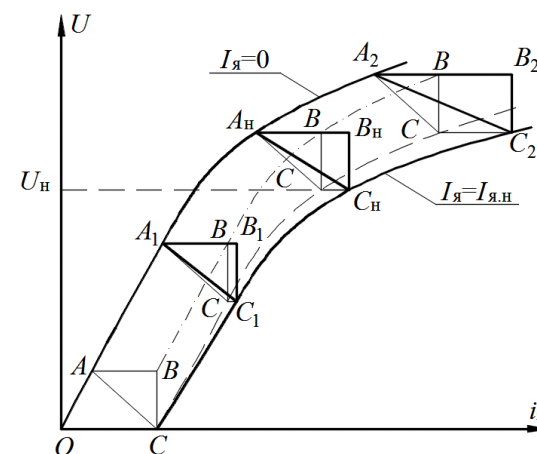


Рис. 1.5

Розрахункова навантажувальна характеристика будується шляхом пересування характеристичного трикутника з початкового положення ABC , який відповідає режиму КЗ, вершиною A вздовж характеристики холостого ходу паралельно самому собі. Тоді вершина C опише навантажувальну характеристику генератора (пунктирна лінія на рис. 1.5), а вершина B – внутрішню навантажувальну характеристику $E = f(i_3)$.

Однак розрахункова і експериментальна навантажувальні характеристики будуть відрізнятися тим більше, чим більше струм збудження, тому що трикутник ABC , отриманий із характеристик холостого ходу та короткого замикання (див. рис. 1.4), не враховує розмагнічуючої дії поперечної реакції якоря, яка зростає в міру насичення магнітної системи.

Для побудови розрахункової зовнішньої і регулювальної характеристик слід визначити характеристичний трикутник, що враховує дію поперечної реакції якоря при насиченні магнітної системи. Для цього використовують експериментальну навантажувальну характеристику і характеристику холостого ходу. На навантажувальній характеристиці для заданої напруги, наприклад, номінальної, знаходять положення вершини C_n характеристичного трикутника. Від неї паралельно осі ординат відкладають катет $C_n B_n = I_{я.н} R_{я}$ і через точку B_n проводять пряму, паралельну осі абсцис, до перетину з характеристикою холостого ходу в точці A_n , визначаючи катет $A_n B_n$, що виражає сукупну дію і поперечної, і подовжньої реакцій якоря (рис. 1.5). Зіставляючи трикутник ABC , що був отриманий із характеристик холостого ходу і короткого замикання, з трикутником $A_n B_n C_n$, можна виділити НС подовжньої і НС поперечної реакцій якоря.

3.4. Типовий вигляд зовнішньої характеристики генератора представлений на рис. 1.6 (суцільна крива).

Зменшення напруги генератора зі зростанням навантаження обумовлено падінням напруги в колі якоря $I_{я} R_{я}$ і зниженням ЕРС генератора в порівнянні з ЕРС холостого ходу внаслідок розмагнічуючої дії реакції якоря (пунктирна крива на рис. 1.6, яку називають внутрішньою характеристикою генератора).

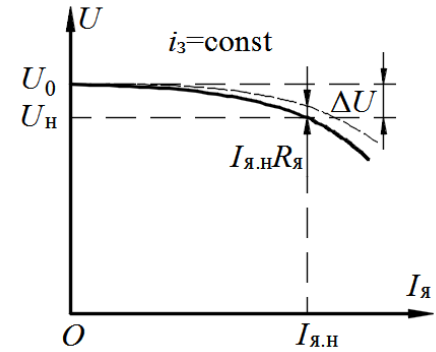


Рис. 1.6

По зовнішній характеристиці визначають номінальну зміну напруги генератора (у відсотках):

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\%,$$

де U_0 – напруга холостого ходу при номінальному струмі збудження.

Для побудови розрахункової зовнішньої характеристики використовуються характеристика холостого ходу і трикутник $A_n B_n C_n$, визначений в п. 3.3. Їх розташовують в першому квадраті координатної площині, а у другому квадраті будують зовнішню характеристику (рис. 1.7).

Точку D_n зовнішньої характеристики, яка відповідає номінальному режиму, одержують перенесенням точки C_n в другій квадрант з абсцисою, що дорівнює номінальному струму якоря $I_{я.н}$. Точку холостого ходу D_0 знаходять перенесенням із характеристики холостого ходу на вісь ординат точки A_0 , яка відповідає номінальному струму збудження $i_{3.н}$. Проміжні точки зовнішньої характеристики отримують, задавши певним значенням струму якоря, наприклад $I = 0,5 I_{я.н}$.

Тоді катети AB і BC характеристичного трикутника, пропорційні струму якоря, і весь трикутник в цілому зменшається вдвічі, причому його вершина A_1 як і раніше буде лежати на характеристиці холостого ходу, а катет B_1C_1 – на прямій $i_{3.н}$.

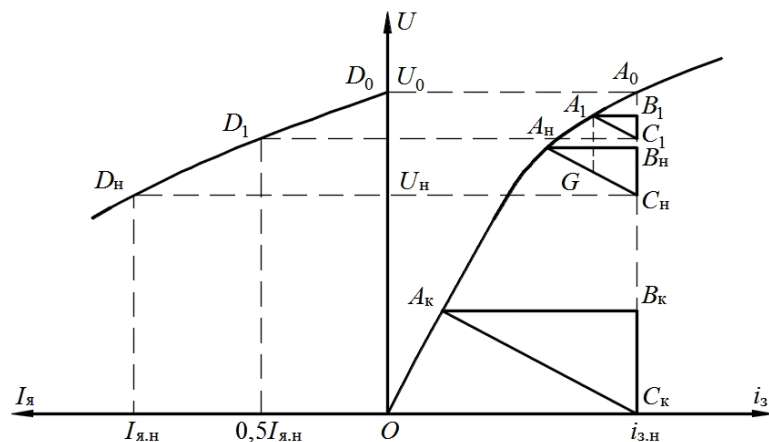


Рис. 1.7

Для побудови цього трикутника ділять навпіл гіпотенузу трикутника $A_н C_н$ і з отриманої точки G проводять паралельно осі ординат пряму до перетину з характеристикою холостого ходу в точці A_1 . З точки A_1 паралельно $A_н C_н$ відкладають відрізок $A_1 C_1 = 0,5 A_н C_н$, одержуючи точку C_1 , яку переносять у другий квадрант, и знаходять точку D_1 с абсцисою $I_я = 0,5 I_{я.н}$.

Аналогічно виконують побудову для інших значень струму якоря, наприклад, $0,25 I_{я.н}$, $0,75 I_{я.н}$, $1,25 I_{я.н}$. Точка короткого замикання $I_к$ визначиться положенням трикутника $A_к B_к C_к$. Вершини B і C характеристичних трикутників для всіх струмів навантаження лежать на прямій $i_{3.н}$, так як зовнішня характеристика визначається незмінним значенням струму збудження $i_{3.н} = OC_к$.

3.5. Вигляд регулювальної характеристики визначається тим, що при навантаженні генератора його напруга падає, і для підтримки напруги на незмінному рівні потрібно збільшувати струм збудження (рис. 1.8).

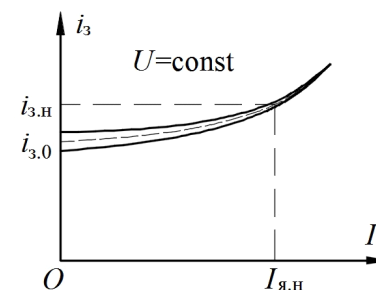


Рис. 1.8

Унаслідок гістерезису вихідна і спадна гілки регулювальної характеристики різняться. За практичну характеристику беруть середню, по якій знаходять номінальну зміну струму збудження:

$$\Delta i_3 = \left(\frac{i_{3.н} - i_{3.0}}{i_{3.н}} \right) \cdot 100\%.$$

Розрахункову регулювальну характеристику будують у четвертому квадранті площини за допомогою тієї ж характеристики холостого ходу і характеристичного трикутника, що й у попередньому пункті (рис. 1.9).

Точку номінального режиму $F_н$ будують за номінальними значеннями струму якоря і струму збудження.

Точку F_0 ($OF_0 = i_{3.0}$) одержують перенесенням на вісь абсцис із характеристики холостого ходу точки A_0 , яка відповідає номінальній напрузі в режимі холостого ходу.

Для проміжних значень струму якоря, наприклад для $I_я = 0,5 I_{я.н}$, як і в п.3.4, проводять із середини гіпотенузи $A_н C_н$ (точка G) пряму до перетину з характеристикою холостого ходу, але, на відміну від попереднього пункту, паралельно осі абсцис і одержують точку A_1 . Відклавши із цієї точки відрізок

$A_1 C_1 = 0,5 A_H C_H$ паралельно $A_H C_H$, знаходять точку C_1 , яку переносять у четвертий квадрант з абсцисою $I_{я} = 0,5 I_{я.н}$, одержуючи точку F_1 регулювальної характеристики. Аналогічно будують точки для струмів якоря, рівних $0,25 I_{я.н}$, $0,75 I_{я.н}$, $1,25 I_{я.н}$.

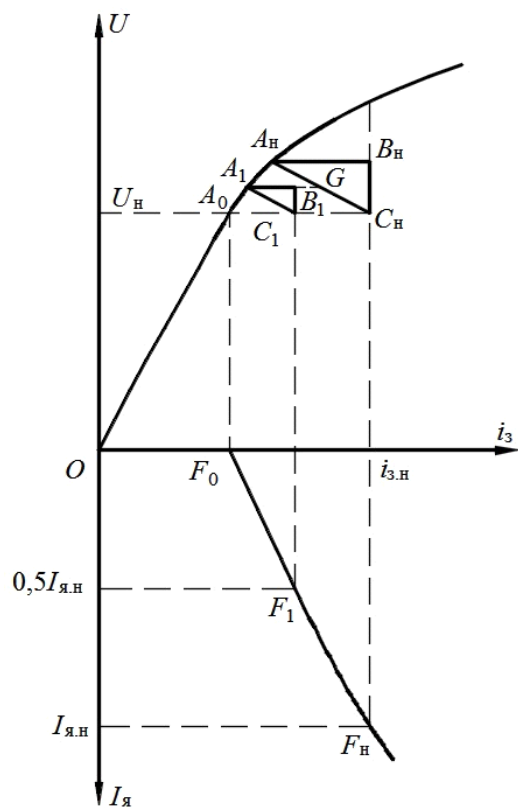


Рис. 1.9

Запитання для самоконтролю

1. Які магнітні поля має генератор постійного струму?
2. Чому сердечники полюсів МПС виготовляють із шихтованої сталі?
3. Які існують характеристики генераторів постійного струму?
4. Що відображають катети характеристичного трикутника генератора?
5. Що таке реакція якоря?

реостата $R2$ встановити номінальне значення струму збудження. Самозбудження генератора перевіряють за показниками вольтметра $PV2$ й амперметра $PA4$ в колі збудження. Якщо вольтметр показує залишкову напругу, а генератор не збуджується, необхідно зменшити опір кола збудження, тому що в цьому випадку він більший від критичного. Генератор також не буде збуджуватися, якщо напрямки полів залишкового намагнічування й обмотки збудження – зустрічні.

При відсутності залишкового магнетизму (показання вольтметра $PV2$ рівні нулю) необхідно намагнітити магнітне коло генератора, подавши напругу на обмотку збудження від незалежного джерела живлення.

2.2. Характеристика холостого ходу

Характеристику холостого ходу $U_0 = f(i_3)$ знімають при $I = 0$ ($I_{\text{я}} = i_3$), $n = n_{\text{н}} = \text{const}$. Знімають спадну гілку характеристики. Для цього спочатку встановлюють струм збудження, що відповідає $U_0 = 1,2 U_{\text{н}}$, а потім, зменшуючи його, знімають п'ять-шість точок до $i_3 = 0$.

2.3. Зовнішня характеристика

Зовнішню характеристику $U = f(I_{\text{я}})$ знімають при $R_3 = \text{const}$. Спочатку реостатами $R3$, $R4$ встановлюють точку номінального навантаження: $U = U_{\text{н}}$, $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$, $n = n_{\text{н}}$. Для неї визначають номінальний струм збудження $i_{3.н}$ і відповідний йому опір кола збудження $R_{3.н} = U_{\text{н}} / i_{3.н}$, які при проведенні експерименту зберігається незмінним.

Експериментальні дані заносять у табл. 1.1.

2.4. Навантажувальна характеристика

Навантажувальну характеристику $U = f(i_3)$ знімають при $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}} = \text{const}$, $n = n_{\text{н}} = \text{const}$. Експериментальні дані заносять у табл. 1.1.

2.5. Регульовальна характеристика

Регульовальну характеристику $i_3 = f(I_{\text{я}})$ знімають при $U = U_{\text{н}} = \text{const}$ і $n = n_{\text{н}} = \text{const}$. Експериментальні дані заносять у табл. 1.1.

2.6. Випробування генератора змішаного збудження. Схема випробувань генератора змішаного збудження наведена на рис. 2.1.

Випробування здійснюється для двох випадків включення послідовної обмотки стосовно паралельної: згідного і зустрічного. В обох випадках знімаються такі характеристики:

- зовнішня $U = f(I_{\text{я}})$ при $R_3 = \text{const}$ і $n = n_{\text{н}} = \text{const}$;
- навантажувальна $U = f(i_3)$ при $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}} = \text{const}$, $n = n_{\text{н}} = \text{const}$;
- регульовальна $i_3 = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{н}} = \text{const}$ і $n = n_{\text{н}} = \text{const}$.

Методика зняття характеристик і межі регулювання такі ж, як і для генератора паралельного збудження. Дані випробувань заносять у табл. 1.1.

3. Обробка результатів випробувань

У звіті представляють зовнішні, навантажувальні, регульовальні характеристики при паралельному і змішаному збудженні на окремому рисунку для кожного виду характеристик.

3.1. Графічно знаходять значення критичного опору кола збудження $R_{\text{кр}}$ за характеристикою холостого ходу при $n = n_{\text{н}}$, $n = 0,75n_{\text{н}}$ і $n = 0,5n_{\text{н}}$.

Характеристики холостого ходу при $n = 0,75n_{\text{н}}$ і $n = 0,5n_{\text{н}}$ визначають шляхом перерахунку характеристики, знятої при $n = n_{\text{н}}$, змінюючи напругу U пропорційно заданій частоті. Порівнюють значення $R_{\text{кр}}$ для різної частоти обертання. Критичний опір визначається як тангенс кута між дотичною L ,

проведеною до початкової ділянки характеристики холостого ходу, і віссю абсцис (кут $\alpha_{кр}$ на рис. 2.2).

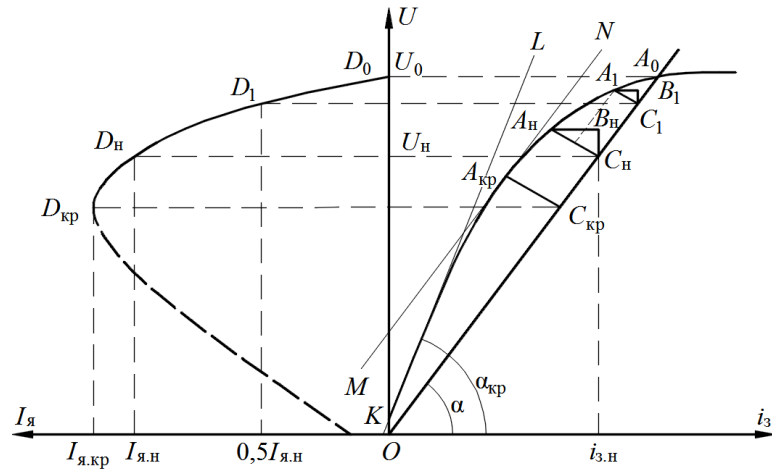


Рис. 2.2

3.2. Побудова зовнішньої характеристики для генератора паралельного збудження за характеристикою холостого ходу і характеристичним трикутником. Порівняння побудованої і експериментальної характеристик.

Побудова характеристики (див. рис. 2.2) здійснюється так само, як і для генератора незалежного збудження (див. лабораторну роботу № 1), але з урахуванням того, що в генераторі паралельного збудження струм i_3 змінюється пропорційно напрузі U .

Залежність $i_3 = f(U)$ зображена прямою OA_0 , проведеною з початку координат під кутом α до осі абсцис, причому $\tan \alpha = R_{з.н} = U_n / i_{з.н}$ визначається з експерименту п. 2.3. Характеристика холостого ходу $U_0 = f(i_3)$ подана на рис. 2.2 кривою OA_0 .

Побудову характеристичного трикутника $A_n B_n C_n$ для $I_a = I_{я.н}$ виконують у такому порядку:

1) визначають положення точки C_n на перетині прямих OA_0 і $U = U_n$;

2) вирахувавши падіння напруги в колі якоря генератора $B_n C_n = I_{я.н} R_{я}$, відкладають відрізок $B_n C_n$ паралельно осі ординат та отримують точку B_n ;

3) з точки B_n паралельно осі абсцис проводять пряму до перетину з характеристикою холостого ходу й отримують точку A_n .

Вважаючи, що сторони характеристичного трикутника змінюються пропорційно струму в колі якоря, можна побудувати інші точки зовнішньої характеристики генератора. Так, для побудови точки зовнішньої характеристики, що відповідає значенню струму $I_a = 0,5 I_{я.н}$, через середину гіпотенузи характеристичного трикутника $A_n B_n C_n$ проводять пряму, яка паралельна прямій OA_0 , до перетину з характеристикою холостого ходу в точці A_1 .

Точка A_1 вершина характеристичного трикутника, який відповідає $I_a = 0,5 I_{я.н}$. Відклавши відрізок $A_1 C_1$ паралельно $A_n C_n$, отримують точку C_1 . Пряма, проведена паралельно осі абсцис через точку C_1 , перетинаючись із прямою, яка проведена паралельно осі ординат через точку $I_a = 0,5 I_{я.н}$, утворює точку зовнішньої характеристики D_1 при $I_a = 0,5 I_{я.н}$.

Для одержання критичного струму $I_{я.кр}$ необхідно провести дотичну MN до характеристики холостого ходу паралельно прямій OA_0 і з точки дотику $A_{кр}$ побудувати відрізок $A_{кр} C_{кр}$, паралельний гіпотенузі $A_n C_n$ характеристичного трикутника $A_n B_n C_n$. Тоді

$$I_{кр} = \frac{A_{кр} C_{кр}}{A_n C_n} I_{я.н}.$$

Запитання для самоконтролю

1. Що таке самозбудження генератора? Коли воно можливе?
2. Як відрізняються зовнішні характеристики генераторів паралельного і змішаного збудження? Чому?
3. Як впливає на стабільність роботи генератора змішаного збудження наявність послідовної обмотки збудження?
4. Що буде з генератором змішаного збудження, у якого обмотки включені зустрічно, якщо відключити послідовну обмотку?

Лабораторна робота №3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

1. Обсяг роботи

- 1.1. Зняти, розрахувати і побудувати робочі характеристики.
- 1.2. Зняти, розрахувати і побудувати штучні механічні характеристики:
 - для двох значень додаткового опору в колі якоря двигуна;
 - для номінального струму збудження (більше або менше номінального значення);
 - для половинної напруги на обмотці якоря при номінальному струмі збудження.
- 1.3. Зробити регулювання частоти обертання двигуна зміною опору реостата в колі якоря. Розрахувати і побудувати залежності $I_{\text{я}}, n, z = f(R_{\text{д}})$.
- 1.4. Зробити регулювання частоти обертання двигуна зміною струму збудження. Розрахувати і побудувати залежності $I_{\text{я}}, n, z = f(i_{\text{з}})$.
- 1.5. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

Схема для випробування двигуна паралельного збудження наведена на рис. 3.1.

При прямому вмиканні нерухомого двигуна в мережу в колі якоря з'являється струм

$$I_{\text{д}} = U_{\text{м}} / R_{\text{я}},$$

де $U_{\text{м}}$ – напруга мережі; $R_{\text{я}}$ – опір кола якоря.

При $U = U_n$ струм I_d у десятки разів перевищує номінальний, тому що опір кола якоря дуже малий. Тому для обмеження струму в коло якоря вводиться пусковий реостат $R1$. Звичайно пусковий опір обирається таким, щоб початковий пусковий струм $I_{п} = (1,4 \dots 1,7) I_n$.

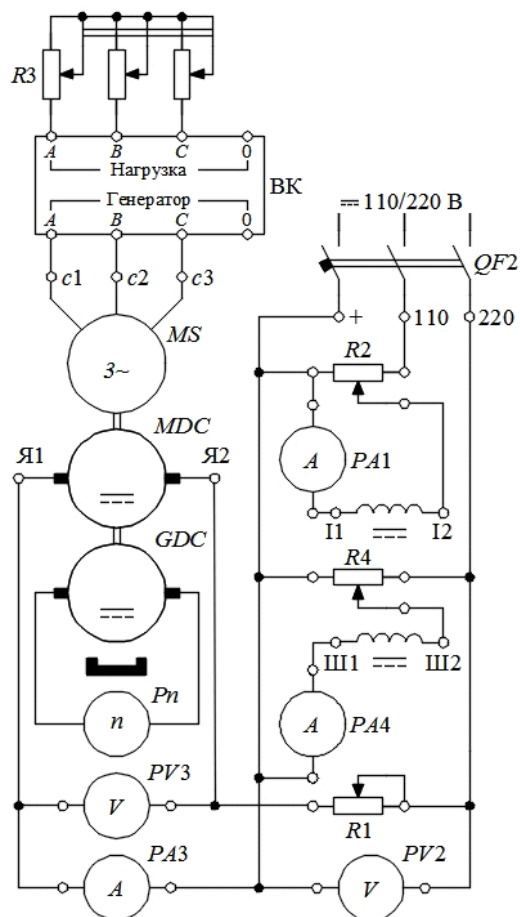


Рис. 3.1

Увага! Перед пуском двигуна переконайтеся, що ручка пускового реостата $R1$ знаходиться в початковому положенні (крайнє положення при обертанні проти годинникової стрілки). При вимиканні двигуна від мережі ручку пускового реостата повернути в початкове положення.

2.1. Робочі характеристики

Залежності частоти обертання n , моменту обертання M_2 , споживаної потужності P_1 і ККД з від корисної потужності на валу P_2 або від струму якоря двигуна $I_я$ називаються робочими характеристиками.

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження знімають при напрузі мережі $U_m = U_n$, струмі збудження $i_{з.д} = i_{з.д.н} = \text{const}$, що відповідає $I_я = I_{я.н}$ при $n = n_n$. Для цього спочатку за допомогою навантажувального генератора і реостата $R4$ в колі збудження двигуна встановлюють номінальне навантаження двигуна $I_я = I_{я.н}$ при $n = n_n$.

Потім, залишаючи незмінним опір реостата $R4$ в колі збудження двигуна, змінюють реостатом $R3$ гальмівний момент на валу двигуна в межах від $M_2 = M_n$ до $M_2 = 0$. Експериментальні дані записують у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. ($U_m = \dots \text{В}$, $I_{\Gamma} = \dots \text{А}$, $I_{з.Г} = \dots \text{А}$)

№	Експериментальні дані				Розрахункові дані									
	U_d	$I_я$	$I_{з.д}$	n	$R_{\text{дод}}$	P_1	P_R	P_e	$P_{\text{щ}}$	P_0	$P_{\text{дод}}$	P_2	η	M_2
	В	А	А	об/хв	Ом			Вт						Нм

Таблиця 3.2. ($U_m = \dots \text{В}$, $I_{\Gamma} = \dots \text{А}$, $I_{з.Г} = \dots \text{А}$)

№	Експериментальні дані				Розрахункові дані										
	$U_{\text{д}}$	$I_{\text{я}}$	$I_{\text{з.д}}$	n	P_1	$P_{\text{е}}$	$P_{\text{ш}}$	P_0	$P_{\text{дод}}$	ΣP	P_2	P_R	$R_{\text{дод}}$	η	M
	В	А		об/хв	Вт									Ом	

2.2. Штучні механічні характеристики

2.2.1 Механічні характеристики при введенні в коло якора додаткового опору

Характеристики знімають при $U = U_n = \text{const}$, $i_{3,д} = i_{3,д,н} = \text{const}$, $R_{\text{дод}} = \text{const}$ для двох значень $R_{\text{дод}}$, підібраних так, щоб при $M_2 = M_n$ частота обертання двигуна n знаходилася в діапазоні $(0,7 \dots 0,9) n_n$ і $(0,4 \dots 0,6) n_n$.

Номинальний момент двигуна встановлюють за номінальним струмом якора. Гальмівний момент M_2 на валу двигуна змінюють у межах від M_n до 0. Експериментальні дані записують у табл. 3.2.

2.2.2 Механічна характеристика для неномінального струму збудження

Характеристики знімають при $U_m = U_n = \text{const}$, $i_{3,д} = \text{const}$, $R_{\text{дод}} = 0$ для підвищеного $i_{3,д} = (1,1 \dots 1,2) i_{3,д,н}$ або зниженого $i_{3,д} = (0,7 \dots 0,9) i_{3,д,н}$ струму збудження (задається викладачем). Момент навантаження двигуна встановлюють за номінальним струмом якора. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють в межах від $M_2 = M_n$ до $M_2 = 0$. Експериментальні дані записують в таблицю 3.1.

2.2.3 Механічні характеристики при половинній напрузі на якорі двигуна

Двигун вмикають у мережу з напругою $U_m = 0,5 U_n$, при цьому за допомогою реостата $R4$ встановлюють номінальний струм у колі збудження $i_{3,д} = i_{3,д,н}$. Гальмівний момент M_2 на валу двигуна змінюють у межах від M_n до 0. Експериментальні дані записують у табл. 3.1.

2.3. Регулювання частоти обертання двигуна зміною опору реостата в ланцюзі якора

Регулювання частоти обертання двигуна зміною опору реостата $R1$ в колі якора роблять при $U_m = U_n = \text{const}$, $i_{3,д} = \text{const}$ і номінальному моменті на валу двигуна $M_2 = M_n$.

Спочатку навантажують двигун на номінальну потужність ($U_m = U_n$, $I_a = I_{a,н}$, $n = n_n$), фіксуючи струм збудження і струм якора навантажувального генератора MS , який при проведенні експерименту підтримують незмінним за допомогою реостата $R3$. Збільшуючи опір реостата $R1$ у колі якора двигуна, знімають п'ять-шість точок при зміні частоти обертання від $n = n_n$ до $n = (0,3 \dots 0,5) n_n$. Експериментальні дані заносять у табл. 3.2.

2.4. Регулювання частоти обертання двигуна зміною струму збудження

Регулювання виконують при $U_m = U_n = \text{const}$ і $M_2 = M_n = \text{const}$.

Двигун навантажують номінальною потужністю при $U_m = U_n$, $I_a = I_{a,н}$, $n = n_n$. Потім, записавши струм збудження $I_{3,г}$ і струм якора I_a навантажувального генератора MS , які при проведенні експерименту за допомогою реостата $R3$ підтримують незмінними, регулюють струм збудження двигуна $I_{3,д}$, збільшуючи його частоту обертання до тих пір, доки струм якора не досягне $1,5 I_{a,н}$. Експериментальні і розрахункові дані заносять у табл. 3.1.

3. Обробка результатів випробувань

Робочі та механічні характеристики двигуна паралельного збудження розраховують за такими формулами:

- споживана з мережі потужність $P_1 = U_m (I_a + I_{3,д})$;
- електричні втрати в обмотках кола якора $P_e = I_a^2 R_a$;
- електричні втрати в щітковому контакті $P_{щ} = 2 I_a \Delta U_{щ} \approx 2 I_a$ тому, що приймається ($\Delta U \approx 1$ В);
- втрати холостого ходу $P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{магн}}$ (механічні – $P_{\text{мех}}$, магнітні – $P_{\text{магн}}$) задаються кривими $P_{\text{мех}} = f(n)$ і $P_{\text{магн}} = f(n)$ для конкретної машини;

- додаткові втрати $P_{\text{дод}} = \left(\frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{я.н}}} \right)^2 0,01 \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$;
- сумарні втрати двигуна $\Sigma P = P_{\text{е}} + P_{\text{щ}} + P_0 + P_{\text{дод}}$;
- додатковий опір в колі якоря $R_{\text{дод}} = \frac{U_{\text{м}} - U_{\text{я}}}{I_{\text{я}}}$ (для п. 2.2.1

береться середнє значення $R_{\text{дод}}$);

- втрати в додатковому опорі в колі якоря двигуна

$$P_R = I_{\text{я}}^2 R_{\text{дод}};$$

- корисна потужність на валу двигуна $P_2 = P_1 - \Sigma P - P_R$;

- момент на валу двигуна $M_2 = \frac{30 P_2}{\pi n}$ (n – частота обертання, об/хв);

- ККД двигуна $\eta = 1 - \frac{\Sigma P + P_R}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_1} 100\%$.

Пояснення до результатів випробувань

1. *Робочими характеристиками* двигунів паралельного збудження називаються залежності $P_1, I_{\text{я}}, M_2, n, \eta = f(P_2)$ при $U_{\text{м}} = U_{\text{н}}, i_{\text{з.д}} = i_{\text{з.д.н}} = \text{const}$ (рис. 3.2, 3.3).

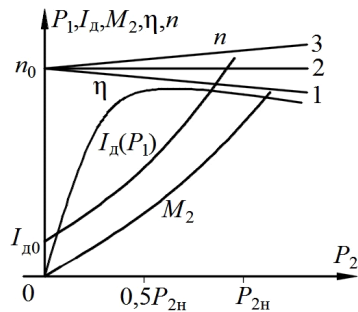


Рис.3.2

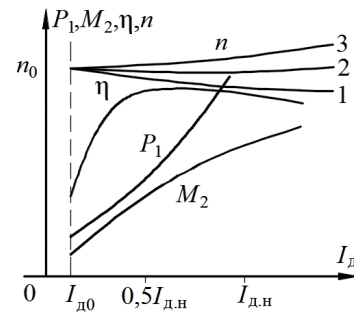


Рис.3.3

Залежність струму якоря $I_{\text{д}} = f(P_2)$ визначають з виразу для електромагнітної потужності

$$P_{\text{ем}} = P_2 + P_0 = M_{\text{ем}} 2\pi n = 2\pi c_{\text{м}} \Phi n I_{\text{д}},$$

де Φ – потік при навантаженні, що складається з потоку збудження і потоку реакції якоря.

Таким чином,

$$I_{\text{д}} = \frac{P_2}{c_{\text{м}} \Phi n} + \frac{P_0}{c_{\text{м}} \Phi n} = I_2 + I_{\text{д0}},$$

де $I_{\text{д0}}$ – струм холостого ходу; $I_{\text{д0}} \approx (0,05 \dots 0,1) I_{\text{д.н}}$

Зі збільшенням корисної потужності P_2 потік Φ , унаслідок дії реакції розмагнічування якоря, дещо зменшується, при цьому частота n обертання також зменшується, тому опуклість кривої $I_{\text{д}} = f(P_2)$ буде спрямована в бік осі абсцис.

Залежність $n = f(P_2)$ визначається з рівняння ЕРС:

$$U = E + I_{\text{д}} R_{\text{я}} = c_{\text{е}} n \Phi + I_{\text{д}} R_{\text{я}};$$

$$n = \frac{U - I_{\text{д}} R_{\text{я}}}{c_{\text{е}} \Phi} = n_0 - \Delta n.$$

Оскільки $U_{\text{м}} = U_{\text{н}} = \text{const}$ та $i_{\text{з.д}} = \text{const}$, то на частоту обертання n двигуна паралельного збудження впливають два фактори: спад напруги $I_{\text{д}} R_{\text{я}}$ і реакція якоря.

Зі збільшенням навантаження спад напруги збільшується, чому відповідає зменшення частоти обертання, і навпаки, при щітках, які встановлені на нейтралі, реакція якоря розмагнічує двигун і прагне збільшити його частоту обертання.

Вигляд залежності $n = f(P_2)$ або *швидкісної характеристики* $n = f(I_{\text{д}})$ визначається регулюючою дією обох чинників.

На рис. 3.2 і рис. 3.3 зображені залежності для трьох випадків:

- переважає спад напруги $I_d R_{\text{я}}$ (крива 1);
- обидва фактори практично зрівноважені (крива 2);
- переважає дія реакції якоря (крива 3).

В усіх випадках варто мати на увазі, що зі збільшенням навантаження дія реакції розмагнічування якоря зростає не пропорційно струму I_d , а в більшому ступені. Тому всі швидкісні характеристики мають опуклість у бік осі абсцис. Звичайна форма швидкісної характеристики $n = f(I_d)$ двигуна паралельного збудження – падаюча швидкісна характеристика (крива 1 на рис. 3.3).

Моментна характеристика $M_2 = f(I_d)$ при $U_m = U_n = \text{const}$; $i_{\text{зд}} = \text{const}$, як це впливає з формули $M_2 = c_m \Phi I_d$, повинна бути прямолінійна, але через дію реакції розмагнічування якоря результуючий потік зменшується. Залежність $M_2 = f(I_d)$ має опуклість нагору, тому що момент зростає повільніше від струму.

Залежність $M_2 = f(P_2)$ буде мати опуклість у бік осі абсцис, тому що зі збільшенням P_2 частота обертання зменшується.

ККД двигуна $\eta = f(P_2)$ або $\eta = f(I_d)$. Характер залежності ККД від навантаження визначається залежністю втрат у двигуні від струму якоря:

$$\Sigma P = P_0 + \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}.$$

Тоді ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{U(I_{\text{я}} + I_{\text{д.з}}) - (P_0 + \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}})}{U(I_{\text{я}} + I_{\text{д.з}})}.$$

Нехтуючи струмом збудження, одержуємо

$$\eta \approx 1 - \frac{P_0}{UI_{\text{я}}} - \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{U} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U}.$$

Звідси випливає, що при малих навантаженнях, коли електричні втрати незначні, η із збільшенням струму буде зростати. При струмах навантаження, близьких до номінального, електричні втрати перевищать втрати холостого ходу і з буде зменшуватися майже пропорційно струму якоря.

Максимум ККД настає при рівності втрат холостого ходу і втрат, які залежать від квадрата струму: $P_e = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$.

2. Механічні характеристики $n = f(M_2)$ подані на рис. 3.4.

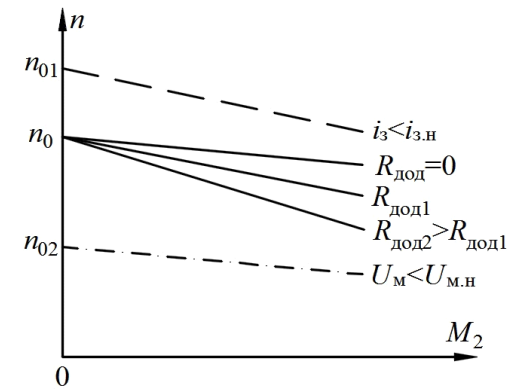


Рис. 3.4

Механічні характеристика, знята при $R_{\text{дод}} = 0$, називається *природною*, а при $R_{\text{дод}} \neq 0$ – *штучною*. З рівняння ЕРС двигуна при введенні в коло якоря додаткового опору випливає

$$n = \frac{U - I_d (R_{\text{я}} + R_{\text{дод}})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n.$$

При $I_3 = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$ механічні характеристики двигуна являють собою прямі лінії, вигляд яких залежить від напруги мережі, магнітного потоку і опору в колі якоря.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке робочі характеристики двигуна?
2. Чому прямий пуск ДПС використовується рідко?
3. Які є способи регулювання частоти обертання двигунів?
4. Що таке механічні характеристики ДПС?
5. Як знаходиться ККД двигуна? Які втрати потужності виникають у ДПС при роботі?

Лабораторна робота №4

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

1. Обсяг роботи

1.1. Зняти, розрахувати і побудувати робочі характеристики при згідному і зустрічному вмиканні послідовної обмотки збудження.

1.2. Зняти, розрахувати і побудувати штучні механічні характеристики при згідному і зустрічному вмиканні послідовної обмотки збудження:

- для двох значень додаткового опору в колі якоря;
- для струму збудження в колі паралельної обмотки збудження, відмінного від номінального;
- для половинної напруги на обмотці якоря при номінальному струмі паралельної обмотки збудження.

1.3. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

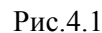
Схема для випробування двигуна наведена на рис. 4.1.

Пуск двигуна здійснюється за допомогою пускового релюстата $R1$. Навантаженням двигуна є синхронний генератор MS , що, у свою чергу, працює на навантажувальні опори $R3$.

2.1. *Робочі характеристики* двигуна змішаного збудження знімаються так само, як і робочі характеристики двигуна паралельного збудження: при напрузі мережі $U_m = U_n$ та струмі збудження паралельної обмотки $i_{з.ш} = i_{з.ш.н} = \text{const}$.

Спочатку визначають номінальне значення струму збудження паралельної обмотки $i_{з.ш.н}$. Для цього відключають

38



2.2.3 Для зняття механічних характеристик при половинній напрузі на якорі двигун вмикають у мережу з напругою $U_{\text{м}} = 0,5U_{\text{н}}$. При цьому за допомогою реостата $R4$ в колі паралельної обмотки збудження Ш1Ш2 встановлюють струм збудження $i_{\text{з.ш}} = i_{\text{з.ш.н}}$. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від M_2 , що відповідає $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$, до $M_2 = 0$. Експериментальні дані записують у табл. 3.1.

3. Обробка результатів випробувань

Характеристики двигуна змішаного збудження розраховують за методикою, що описана в роботі № 3.

З метою наочного визначення впливу послідовної обмотки збудження на вигляд штучних механічних характеристик побудову цих характеристик виконують в одних координатних осях в однакових масштабах.

Запитання для самоконтролю

1. Як відрізняються механічні характеристики двигунів паралельного і змішаного збудження?
2. Як відбувається реостатний пуск двигуна?
3. Що буде з двигуном змішаного збудження, у якого обмотки збудження включені узгоджено, якщо розімкнути коло обмотки паралельного збудження?
4. Як зовнішньо відрізняються паралельна і послідовна обмотки збудження?

Лабораторна робота №5

ВИПРОБУВАННЯ ТРИФАЗНОГО ДВОХОБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Обсяг роботи

1.1. Провести експерименти холостого ходу, трифазного короткого замикання і навантаження трансформатора.

1.2. За даними експерименту холостого ходу визначити коефіцієнт трансформації, струм і втрати холостого ходу при номінальній напрузі; побудувати характеристики холостого ходу.

1.3. За даними експерименту трифазного короткого замикання визначити напругу і втрати короткого замикання при номінальному струмі, побудувати характеристики короткого замикання.

1.4. За даними експериментів холостого ходу і трифазного короткого замикання

– визначити параметри і побудувати заступну схему трансформатора;

– розрахувати і побудувати залежність процентної зміни напруги трансформатора від коефіцієнту навантаження $\Delta U\% = f(k_{\text{нв}})$ при заданому $\cos \varphi_2$;

– розрахувати і побудувати криву залежності ККД трансформатора від коефіцієнту навантаження $\eta = f(k_{\text{нв}})$ при заданому $\cos \varphi_2$.

1.5. За даними експерименту навантаження

– побудувати точну векторну діаграму трансформатора для режиму з $I_2 = I_{2\text{н}}$;

– побудувати експериментальну залежність $U_{2\text{л}} = f(I_2)$;

– розрахувати і побудувати залежність $U_{2\text{л}} = f(I_2)$ та порівняти її з експериментальною.

1.6. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

Схеми випробування трансформатора наведені на рис. 5.1.

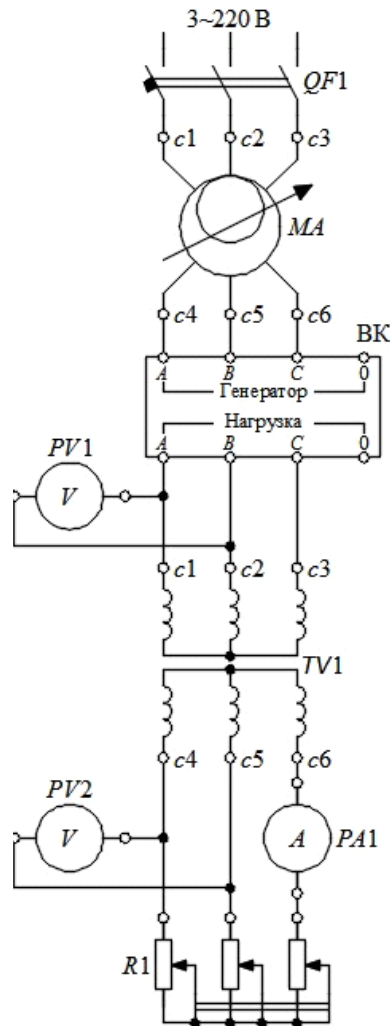


Рис. 5.1

Для плавної зміни напруги на первинній обмотці трансформатора $TV1$ підключається до мережі через індукційний регулятор MA .

2.1. Експеримент холо-стого ходу здійснюється при розімкненій вторинній обмотці трансформатора $TV1$.

Змінюючи за допомогою індукційного регулятора первинну напругу $U_{1л}$ в межах від $(1,1 \dots 1,2) U_{1н}$ до $(0,4 \dots 0,5) U_{1н}$, знімають декілька точок і необхідні показання приладів записують у табл. 5.1, де $U_{1л}$, $U_{2л}$ – лінійні напруги первинної і вторинної обмоток; I_A , I_B , I_C – струми у фазах первинної обмотки трансформатора в режимі холостого ходу; P_A , P_B , P_C , P – фазні та загальна потужності, які споживаються з мережі.

Таблиця 5.1

№	$U_{1л}$	$U_{2л}$	I_{A0}	I_{B0}	I_{C0}	P_{A0}	P_{B0}	P_{C0}
	В		А			Вт		

2.2. При трифазному короткому замиканні вторинна обмотка трансформатора замикається накоротко. На відміну від експлуатаційного КЗ, у даному експерименті, щоб уникнути протікання в обмотках надмірно великих струмів, напруга, яка підводиться до трансформатора, повинна бути значно нижчою від номінальної: $U_k = (0,03 \dots 0,15) U_n$. Таким чином, перед початком експерименту КЗ необхідно переконатися, що подана на трансформатор напруга близька до нуля. Потім вторинну обмотку замикають і збільшують напругу, поки струм в обмотках не досягне значень $(1,5 \dots 1,7) I_n$. Далі, зменшуючи напругу до можливого мінімуму, знімають п'ять-шість точок, записуючи відповідні показання приладів у табл. 5.2. По закінченню експерименту КЗ перемички на клеммах вторинної обмотки трансформатора *необхідно зняти!*

Таблиця 5.2

№	Експериментальні дані			Розрахункові дані			
	U_K	I_K	P_K	$\cos\varphi_K$	z_K	r_K	x_K
	В	А	Вт		Ом		

2.3. Навантаження трансформатора проводиться за допомогою рідинного реостата $R1$. Знімають кілька точок, змінюючи струм первинної обмотки від мінімально можливого до $(1,1\dots1,2) I_H$ і записують показання приладів в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

№	Експериментальні дані					Розрахункові дані			
	$U_{1л}$	$U_{2л}$	I_1	I_2	P_1	$\cos\varphi_1$	$k_{нв}$	$\Delta u\%$	$U_{2л}$
	В		А		Вт			%	В

3. Обробка результатів випробувань

3.1. *Холостий хід трансформатора.* Коефіцієнт трансформації визначається відношенням фазних ЕРС первинної і вторинної обмоток трансформатора:

$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2},$$

де w_1 та w_2 – кількість витків первинної та вторинної обмоток трансформатора; $E_{1\phi}$ та $E_{2\phi}$ – ЕРС, які індукуються у первинній та вторинній обмотці магнітним потоком, що їх зчіплює.

Експериментально його визначають у режимі холостого ходу одночасним виміром напруги на затискачах первинної і вторинної обмоток за допомогою двох вольтметрів $PV1$

і $PV2$. Оскільки при холостому ході $E_{1\phi} \approx U_{1\phi}$ і $E_{2\phi} \approx U_{2\phi}$, то $k = U_{1\phi} / U_{2\phi}$.

Для трифазних трансформаторів значення k на практиці часто знаходять за лінійними напругами:

$$k = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}.$$

При однаковій схемі з'єднання первинної і вторинної обмоток (Y/Y або Δ/Δ) фазний і лінійний коефіцієнти трансформації рівні, при різних схемах з'єднання вони відрізняються в $\sqrt{3}$ разів. За даними п. 2.1 обчислюють значення k і заносять у табл. 5.4, а потім визначають його середнє арифметичне значення; розраховують також струм холостого ходу I_0 , потужність холостого ходу P_0 і коефіцієнт потужності холостого ходу $\cos\varphi_0$.

Таблиця 5.4

№	$U_{1л}$	$U_{2л}$	k	I_0	P_0	$\cos\varphi_0$	z_0	r_0	x_0
	В			А	Вт		Ом		

У трифазних тристрижневих трансформаторах у режимі холостого ходу струм в обмотках, які розташовані на крайніх стрижнях, більший, ніж струм в обмотці на середньому стрижні. Тому I_0 визначають як середнє значення струмів у фазах, а потужність P_0 розраховують як суму потужностей у фазах:

$$I_0 = \frac{I_{A0} + I_{B0} + I_{C0}}{3}; \quad P_0 = P_{A0} + P_{B0} + P_{C0};$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1л}I_0}.$$

Результати обчислень заносять у табл. 5.4 і за цими даними будують характеристики холостого ходу I_0 , P_0 , $\cos \varphi_0 = f(U_{1л})$,

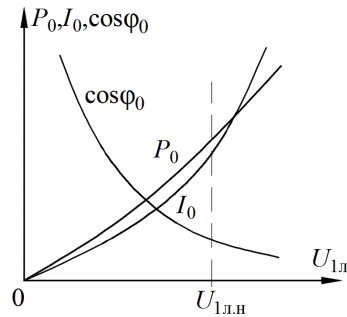


Рис. 5.2

з яких знаходять значення струму $I_{0н}$, потужності $P_{0н}$ і $\cos \varphi_{0н}$, що відповідають номінальній напрузі $U_{1л.н}$. Характерний вигляд цих залежностей представлено на рис. 5.2.

Струм холостого ходу виражають у відсотках від номінального струму трансформатора:

$$I_{0н\%} = (I_{0н} / I_n) 100\%,$$

де I_n номінальний струм визначається за паспортними даними трансформатора:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{1л.н}}.$$

Струм холостого ходу складає незначну величину (2...10%), і тому на холостому ході втрати в міді обмоток мізерно малі в порівнянні з втратами в сталі p_c . Таким чином, $P_0 \approx p_c$.

При заданій частоті f втрати $p_c \equiv B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_{1ф}^2 \approx U_{1ф}^2$,

тобто P_0 практично пропорційна $U_{1ф}^2$; у той же час збільшення напруги, а отже, і насичення магнітного кола трансформатора викликає більш швидке, у порівнянні з магнітним потоком Φ_m , зростання НС і струму I_0 , чим і визначаються вигляд характеристики холостого ходу і закономірності зміни параметрів холостого ходу $z_0 = r_0 + jx_0$, що розраховуються за формулами:

$$z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Результати цих розрахунків також заносять у табл. 5.4.

3.2. Трифазне коротке замикання. Фазний струм, що протікає по обмотках трансформатора, у режимі короткого замикання

$$I_k = \frac{\dot{U}_{1к}}{\dot{z}_1 + j\dot{z}'_2} = \frac{\dot{U}_{1к}}{\dot{z}_к} = \frac{\dot{U}_{1к}}{r_к + jx_к},$$

де $\dot{U}_{1к}$ – фазна напруга, яка підводиться до первинної обмотки; $z_к$, $r_к$, $x_к$ – параметри короткого замикання.

У режимі короткого замикання напруга мала; таким чином, невеликий і магнітний потік ($\Phi_m \cong U_{1ф}$). При цьому магнітне коло трансформатора не насичене і параметри короткого замикання практично не змінюються. Отже, струм I_k змінюється пропорційно напрузі, а втрати в сталі дуже незначні, тобто потужність у режимі короткого замикання майже цілком витрачається на втрати в міді обмоток $P_k \approx p_m$

і тому пропорційна I_k^2 . Ці закономірності визначають вигляд характеристик короткого замикання I_k , P_k , $\cos \varphi_k = f(U_k)$ (рис. 5.3).

Для побудови характеристик за даними п. 2.2 розраховані значення заносять у табл. 5.3. При цьому струм I_k і напругу U_k

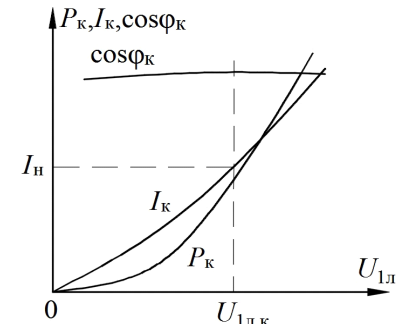


Рис. 5.3

беруть середніми за трьома фазами, а потужність короткого замикання P_K в цьому випадку визначають, як суму потужностей всіх фаз. Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} U_K I_K}.$$

Ці величини дозволяють розрахувати параметри короткого замикання при з'єднанні первинної обмотки трансформатора зіркою:

$$z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3} I_K}; \quad r_K = \frac{P_K}{3 I_K^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2};$$

при з'єднанні трикутником:

$$z_K = \frac{\sqrt{3} U_K}{I_K}; \quad r_K = \frac{P_K}{I_K^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

За характеристиками короткого замикання (див. рис.5.3.) знаходять напругу $U_{K.H}$, потужність $P_{K.H}$ і коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{K.H}$, які відповідають номінальному струму короткого замикання I_H .

Напругу короткого замикання та її активну й реактивну складові визначають у відсотках:

$$u_{K.H\%} = \frac{I_H z_K}{U_H} 100\% = \frac{U_{K.H}}{U_H} 100\%;$$

$$u_{K.a\%} = \frac{I_H r_K}{U_H} 100\% = \frac{P_{K.H}}{U_H I_H} 100\% = \frac{P_{K.H}}{S_H} 100\%;$$

$$u_{K.p\%} = \frac{I_H x_K}{U_H} 100\% = \sqrt{u_{K.H\%}^2 - u_{K.a\%}^2}.$$

3.3. Відсоткова зміна напруги трансформатора визначається розрахунковим шляхом:

$$\Delta U_{\%} = (U_{K.a\%} \cos \varphi_2 + U_{K.p\%} \sin \varphi_2) k_{HB},$$

де $k_{HB} = I_2 / I_{2H}$ – коефіцієнт навантаження трансформатора; $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності вторинного кола (задається викладачем).

Задаючись при визначеному $\cos \varphi_2$ рядом значень k_{HB} у межах від 0 до 1,25 (наприклад, 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25), одержують залежність $\Delta U_{\%} = f(k_{HB})$ або в масштабі струму $\Delta U_{\%} = f(I_2)$. Результати слід занести в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

N_0	k_{HB}	p_M	$p_M + p_c$	P_2	η	$\Delta u\%$
		BT				%

3.4. ККД трансформатора визначається відношенням корисної потужності P_2 , яка віддається трансформатором у навантаження, до потужності P_1 , що споживається з мережі:

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

У силу високих значень ККД трансформаторів прямий метод виміру потужностей P_2 і P_1 призводить до великих похибок, тому практично ККД трансформаторів визначається тільки непрямо – методом окремих втрат. Оскільки $P_1 = P_2 + p_c + p_M$, то

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_M + p_c} \quad \text{або} \quad \eta = 1 - \frac{p_M + p_c}{P_2 + p_M + p_c}.$$

Втрати в міді при номінальному струмі $p_m = P_H$, а при струмі, відмінному від номінального, $p_m = k_{HB}^2 P_{K.H}$.

Втрати в сталі на холостому ходу при номінальній напрузі $p_c = P_{0H}$. Але оскільки при зміні струму навантаження трансформатора в межах до номінального ЕРС $E_{1\phi}$ лише незначно (до 5%) відрізняється від поданої напруги $U_{1\phi}$, тому величини магнітного потоку Φ_m , індукції B_m , а отже, і втрати в сталі змінюються дуже мало. Цими змінами можна знехтувати. Таким чином, $p_c = P_{0H} = \text{const}$.

Корисна потужність трансформатора виражається через його номінальну повну потужність:

$$P_2 = k_{HB} S_H \cos \varphi_2.$$

Тоді

$$\eta = 1 - \frac{P_{0H} + k_{HB}^2 P_{K.H}}{k_{HB} S_H \cos \varphi_2 + P_{0H} + k_{HB}^2 P_{K.H}}.$$

Максимальне значення ККД досягається при $k_{HB}^2 P_{K.H} = P_{0H}$, тобто коли змінні втрати (втрати в міді p_m) будуть дорівнювати постійним (втратам у сталі p_c).

Результати розрахунку ККД заносять у табл. 5.5, заданими

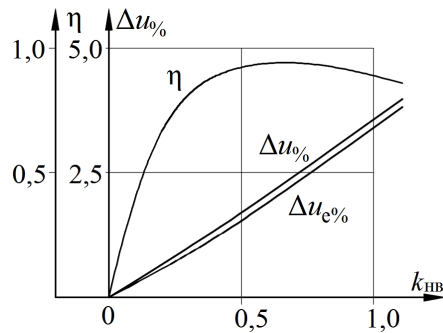


Рис. 5.4

якої будують залежності $\eta = f(k_{HB})$, $\Delta U_{\phi\%} = f(k_{HB})$ — рис. 5.4.

З експерименту навантаження визначається експериментальна залежність $\Delta U_{e\%} = f(k_{HB})$:

$$\Delta U_{e\%} = \frac{U_{0,2} - U_2}{U_{0,2}} 100\%,$$

де $U_{0,2}$ та U_2 — напруги на вторинній обмотці трансформатора в режимі холостого ходу та у режимі навантаження відповідно. Отримана експериментальна залежність будується в тих же осях, що і розрахункові (див. рис. 5.4).

3.5. Параметри заступної схеми трансформатора (рис. 5.5) визначаються через параметри холостого ходу і короткого замикання. У режимі холостого ходу $z_0 = z_1 + z_m$, а оскільки $z_1 \ll z_m$, то можна вважати

$$z_m \approx z_0, \quad r_m \approx r_0, \quad x_m \approx x_0,$$

де параметри холостого ходу відповідають номінальній первинній напрузі U_{1H} .

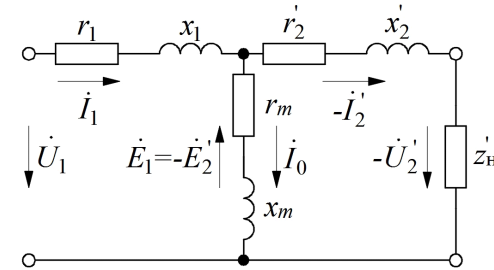


Рис. 5.5

У режимі короткого замикання $z_K \approx z_1 + z_2'$, тому $r_K \approx r_1 + r_2'$, $x_K \approx x_1 + x_2'$, причому приблизно можна вважати $r_1 \approx r_2' = r_K / 2$, $x_1 \approx x_2' = x_K / 2$.

3.6. Навантаження трансформатора. За результатами експерименту і розрахунку навантаження заповнюється табл. 5.3.

У таблиці I_1, I_2 — середнє за фазами значення струму первинної і вторинної обмоток; P_1 — потужність, яка споживається трансформатором із мережі; $\cos \varphi_1 = P_1 / (\sqrt{3} U_{1H} I_1)$ — коефіцієнт потужності трансформатора в режимі навантаження.

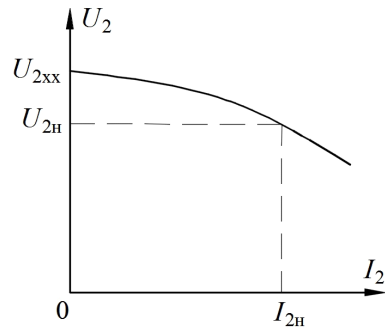


Рис. 5.6

Далі будемо експериментальні і розрахункові зовнішні характеристики трансформатора $U_{2л} = f(I_2)$ (рис. 5.6)

$$U_2 = U_{2xx} \left(\frac{100 - \Delta u_{\%}}{100} \right),$$

де U_{2xx} береться з експерименту холостого ходу при номінальній первинній напрузі

$U_{1л} = U_{1л.н}$, $\Delta U_{\%}$ розраховується за формулою п. 3.3 для отриманих експериментальних значень $k_{нв}$.

3.7. Побудову точної векторної діаграми здійснюють таким чином: обравши масштаби для струму і напруги, відкладають вектори фазної напруги $\dot{U}_1$ і струму $\dot{I}_1$, під кутом φ_1 (рис. 5.7); до кінця вектора $\dot{U}_1$, додають спад напруги на активному й індуктивному опорах первинної обмотки $-\dot{I}_1 r_1$ і $-j\dot{I}_1 x_1$ та одержують вектор ЕРС $-\dot{E}_1$, а також рівний йому і протилежно спрямований вектор $\dot{E}_1 = -\dot{E}_2'$. Перпендикулярно до вектора $\dot{E}_1$ будують вектор магнітного потоку в масштабі потокозчеплення

$$w\Phi = \frac{E_1}{\sqrt{2}\pi f}.$$

За напрямком цього вектора відкладають намагнічуючу складову струму холостого ходу $\dot{I}_{0м} = \dot{I}_{0н} \sin \varphi_{0н}$ і перпендикулярно до неї – активну складову $\dot{I}_{0а} = \dot{I}_{0н} \cos \varphi_{0н}$, одержуючи вектор $\dot{I}_0$. Віднімаючи від нього вектор $\dot{I}_1$, одержують

струм $\dot{I}_2'$. Прибудовуючи до кінця вектора $-\dot{E}_2'$ спад напруги на активному й індуктивному опорах вторинної обмотки $(-\dot{I}_2' r_2$ і $-j\dot{I}_2' x_2')$, знаходять вектор вторинної напруги $\dot{U}_2'$.

Отримане значення $\dot{U}_2'$ перераховують, беручи до уваги коефіцієнт трансформації, до дійсного значення $\dot{U}_2 = \dot{U}_2' / k$ і порівнюють із експериментальним для цього ж режиму роботи.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке трансформатор?
2. Які типи магнітопроводів трансформаторів існують?
3. Що таке заступна схема трансформатора і як вона виглядає?
4. Як спрощується заступна схема трансформатора для режимів холостого ходу та короткого замикання?
5. За яких умов трансформатор має максимальний ККД?

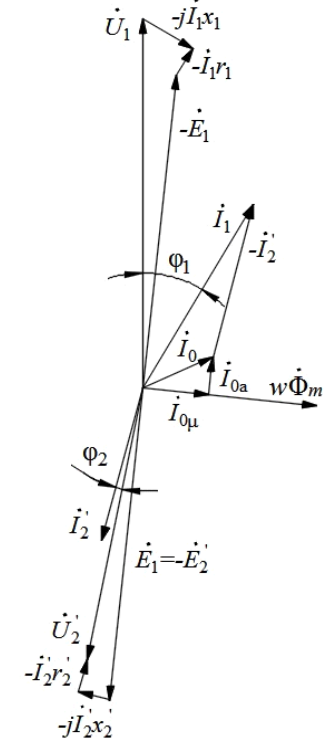


Рис. 5.7

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Вольдек, А. И.** Электрические машины [Текст] / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
2. **Жерве, Г. К.** Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л. : Энергия, 1984. – 248 с.
3. **Копылов, И. П.** Электрические машины [Текст] / И. П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
4. **Брускин, Д. Э.** Электрические машины [Текст]: учебник для электротехн. спец. вузов. Т. 1 / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высш. шк., 1987. – 319 с.
5. **Брускин, Д. Э.** Электрические машины [Текст]: учебник для электротехн. спец. вузов. Т. 2 / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высш. шк., 1987. – 335 с.
6. **Яцун, М. А.** Електричні машини : навч. посібник [Текст] / М. А. Яцун. – Л. : Вид-во Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 427 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
Вимоги до виконання лабораторних робіт	4
Лабораторна робота № 1. Характеристики генератора з незалежним збудженням	6
Лабораторна робота №2. Характеристики генератора паралельного і змішаного збудження	20
Лабораторна робота №3. Характеристики двигуна паралельного збудження	27
Лабораторна робота №4. Характеристики двигуна змішаного збудження	37
Лабораторна робота №5. Випробування трифазного двобмоткового трансформатора	41
Рекомендована література	54

Навчальне видання

**АЛЕКСАНДРОВСЬКИЙ С. Ю.
БАНДУРА С. І.
НОВОГРЕЦЬКИЙ С. М.
ПОДИМАКА В. І.
СТАВИНСЬКИЙ Р. А.**

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ І ТРАНСФОРМАТОРИ**

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
по електричним машинам

У трьох частинах

Частина 1

Комп'ютерне складання та верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 0,0. Тираж 100 прим. Вид № 22. Зам. № 000.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.