

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний морський технічний університет
імені адмірала Макарова

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРИЧНИХ
МАШИН**

Частина 1

Електричні машини постійного струму і трансформатори

Під редакцією А.А. Ставинського

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ

Миколаїв 2003

УДК 21.313.8: 621.313.33

Кімстач О.Ю., Коновалов О.П., Ставинський А.А. Методичні вказівки до лабораторних робіт з електричних машин: У 3 ч. – Ч. 1. Електричні машини постійного струму і трансформатори / Під ред. А.А. Ставинського. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 36 с.

Кафедра суднових електроенергетичних систем

Досліджуються генератори та двигуни постійного струму і трифазні трансформатори. Наведені основні аналітичні співвідношення, які пояснюють електромагнітні процеси машин, що випробовуються. Подані методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з курсу "Електричні машини".

Призначено для студентів електротехнічного факультету УДМТУ.

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. Ю.Д. Жуков;

канд. техн. наук, доц. А.П. Гуров

© Український державний морський
технічний університет, 2003

© Видавництво УДМТУ, 2003

ВСТУП

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

Машини постійного струму набули поширення завдяки своїм характеристикам та можливостям: перш за все 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 вивчення роботи трансформаторів і машин постійного струму різноманітних типів збудження в режимах генераторів та двигунів, а також отримання досконалих знань про електромагнітні процеси та закони, які стосуються зазначених вище перетворювачів енергії.

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

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 та апаратів. Перед складанням схеми необхідно переконатися, що всі автомати і рубильники на робочому місці вимкнені.

Студенти бригади повинні самостійно зібрати схему установки і подати її викладачу для перевірки. Вмикати установку можна тільки з дозволу викладача. Усі зміни в схемі, що пов'язані з приєднанням проводів, повинні робитися при відключеному живленні і нерухомих машинах. Робота під напругою допускається тільки з дозволу викладача із вжиттям відповідних заходів безпеки.

По закінченні роботи бригада подає викладачу для перевірки протокол випробувань. Схему можна розібрати тільки з дозволу викладача. Якщо робота не буде виконана у встановлений розкладом термін, слід погодити з викладачем час додаткових занять. На чергове заняття кожний студент повинен подати звіт з попередньої роботи. Звіт оформляється студентом індивідуально. До одного зі звітів бригади додається протокол випробувань, підписаний викладачем.

Звіт слід оформляти окремо з кожної роботи або з усіх робіт в одному зошиті. Він повинен містити: паспортні дані електричних машин та апаратів; принципові схеми випробувань; дані випробувань і результати розрахунків у табличній формі з зазначенням одиниць вимірів; розрахункові формули і короткі пояснення отриманих результатів; висновки по роботі.

Звіт повинен бути оформлений акуратно. Усі схеми і криві слід будувати з застосуванням креслярських інструментів. Розрахункові й опорні точки на графіках треба чітко позначати. Криві проводити так, щоб розкид точок був рівномірним.

Координатні осі графіків слід градуювати від нульових значень. При побудові декількох графіків з одним аргументом для кожної величини проводиться своя вісь з відповідним градуванням.

Елементи схем повинні зображуватися у відповідності до стан-

дартів ЄСКД. Усі розрахунки виконуються в одиницях СІ. До кожної характеристики для однієї з точок повинен бути проведений типовий розрахунок. При виконанні великого числа однотипних розрахунків рекомендується використовувати ЕОМ.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

При складанні схеми для випробувань електричних машин рекомендується спочатку зібрати струмові (послідовні) кола, а потім у відповідних місцях підключити паралельні гілки, наприклад вольтметри, що шунтують опори і т. д.

При пуску двигунів постійного струму варто попередньо подати живлення в обмотку збудження двигуна, а потім у якірне коло і здійснити пуск плавним виведенням пускового реостата до упора. Після вимикання двигуна пусковий реостат необхідно повернути в початкове положення.

Пуск синхронного двигуна здійснюється при розімкненому колі збудження прямим вмиканням у мережу. Після розгону двигуна подається живлення в обмотку збудження. Для захисту обмотки збудження синхронної машини (СМ) від пробивання ізоляції під час пуску вона замикається на розрядний опір (на передню панель не виведено і на схемах не зазначено).

При знятті характеристик електричних машин попередньо варто перевірити можливість одержання крайніх (верхньої і нижньої) точок. Усього необхідно зняти п'ять-шість точок приблизно через рівні інтервали. Перед тим як записати показання приладів, варто витримати точки протягом приблизно 1 хв для того, щоб установився режим. Правильність зняття характеристик рекомендується перевірити шляхом їхньої побудови. У випадку випадання яких-небудь точок із характеристики необхідно повторити випробування.

Робота № 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

1. Обсяг роботи

1.1. Зняти і побудувати такі характеристики: холостого ходу; навантажувальну; зовнішню; регульовальну; короткого замикання.

1.2. За даними досліду 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 дослідною.

1.3. За характеристикою холостого ходу і навантажувальною характеристикою, що відповідає номінальному струму якоря, побудувати характеристичні трикутники для напруг $U = 0,5U_n$, $U = U_n$ і $U = 1,2U_n$ та порівняти їх із трикутником, отриманим з характеристики холостого ходу і короткого замикання.

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 дослідними.

1.5. Визначити номінальні зміни напруги і струму збудження генератора за дослідними і розрахунковими зовнішньою та регульовальною характеристиками.

1.6. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

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

2.1. Характеристика холостого ходу – це залежність напруги генератора від струму збудження $U = f(i_3)$ 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 $R5$ цілком виводять з бака; зніма-

ють висхідну гілку характеристики, збільшуючи струм збудження від нульового значення до максимального $i_{з\ max}$, що відповідає напрузі $U = (1,2...1,3)U_n$, записуючи значення напруги і струму збудження в табл. 1.1. Потім знімають спадну гілку характеристики, зменшуючи струм збудження від $i_{з\ max}$ до $i_{з} = 0$. В обох випадках зміну струму збудження варто робити тільки в одному напрямку.

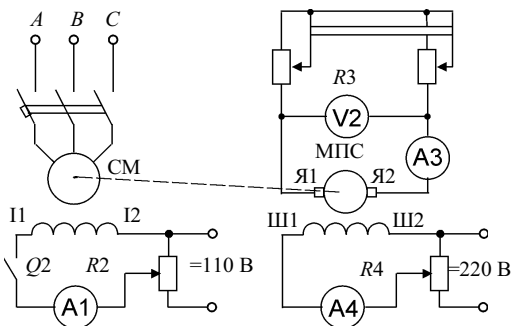


Рис. 1.1

Сталість частоти

обертання забезпечується привідним синхронним двигуном, у якого вона строго фіксована.

2.2. Навантажувальна характеристика являє собою залежність $U = f(i_3)$ при постійному струмі якоря ($I_{я} = \text{const}$) і частоті обертання ($n = n_n = \text{const}$). Характеристику знімають для номінального струму якоря $I_{я} = I_{я.n}$, у такому порядку: встановлюють точку з напругою $U = (1,1...1,2)U_n$ і струмом, $I_{я} = I_{я.n}$ потім, змінюючи струм збудження генератора, знижують напругу до мінімального значення, підтримуючи за допомогою навантажувального реостата $R3$ струм якоря незмінним. Дані досліду заносять у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

№	i_3 , А	U , В	$I_{я}$, А	n , об/хв
1				
...				

Точку навантажувальної характеристики, що відповідає нульовій напрузі, одержують із досліду короткого замикання.

2.3. Зовнішня характеристика – це залежність $U = f(I_{я})$ при $i_3 = \text{const}$ і $n = \text{const}$. Характеристику знімають наступним чином: спочатку встановлюють точку номінального режиму ($U = U_n$, $I = I_{я}$, $n = n_n$) і струм збудження, що відповідає цьому режиму, беруть за номінальний, надалі зберігаючи його незмінним. Потім за допомогою навантажувального реостата змінюють струм якоря в межах від $I_{я} = (1,1...1,2)I_{я.n}$ до $I_{я} = 0$, обов'язково фіксуючи напругу при холостому ході U_0 . Дані досліду записують у табл. 1.1.

2.4. Регулювальна характеристика – залежність $i_3 = f(I_{я})$ при

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

2.5. Характеристика короткого замикання являє собою залежність струму якоря в режимі к.з. від струму збудження $I_{a,k} = f(i_3)$ при $n = n_n = \text{const}$. Для зняття характеристики к.з. коло якоря генератора замикається накоротко через амперметр, для чого в схемі рис. 1.1 виводи навантажувального реостата R_3 шунтуються перемичкою.

Увага! Режим к.з. небезпечний для генератора, і дослід повинен здійснюватися при дуже малих у порівнянні з номінальним значеннях струму збудження. Перед тим як запустити генератор у режимі к.з., варто переконатися, що струм в обмотці збудження дорівнює нулю.

Запустивши генератор, плавним збільшенням струму збудження доводять струм у колі якоря генератора до значення $I_a = 1,2I_{a,n}$, потім, зменшуючи струм збудження до нуля, записують показання приладів у табл. 1.1.

При проведенні дослідів потрібно стежити, щоб не відбулося самозбудження генератора, що може викликати різке збільшення струму якоря понад припустиме значення.

3. Обробка результатів випробувань

3.1. Вигляд характеристики холостого ходу показано на рис. 1.2,а. Висхідна і спадна гілки характеристики різняться внаслідок гістерезису феромагнітних матеріалів, з яких виготовлена магнітна система генератора. За практичну характеристику холостого ходу беруть середню між висхідною і спадною гілками, що приводять до початку координат, зміщуючи її по осі абсцис до збігу точок O_1 і O .

За практичною характеристикою холостого ходу визначають

коефіцієнт насичення магнітної системи машини в номінальному режимі (див. рис. 1.2,б):

$$k_{\mu} = ac/ab = i_{ze} / i_{zd},$$

де відрізок $ab = Od$ еквівалентний струму збудження, необхідному для одержання номінальної напруги 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 насиченням.

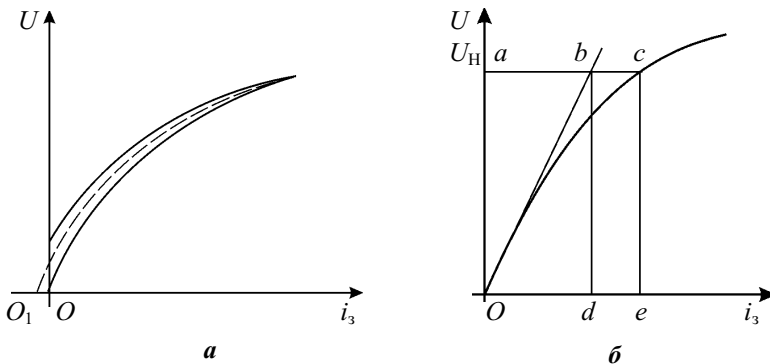


Рис. 1.2

3.2. Характеристика к.з. 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 $I_{я.к} = E/R_{я}$.

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

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

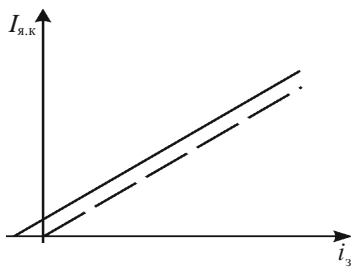


Рис. 1.3

За допомогою характеристик короткого замикання і холостого ходу будують характеристичний трикутник генератора, що відображає вплив опору якірного кола і реакції якоря на роботу генератора. Для його визначення будують в одній координатній системі характеристики холостого ходу і короткого замикання, продовжуючи їх до перетину на осі абсцис у точці O_1 (рис. 1.4). Потім для номінального струму якоря $I_{я,к} = I_{я,н}$ за характеристикою к.з. (2) визначають на осі абсцис відрізок $O_1C = i_{3,к}$, що виражає повну силу намагнічування (НС) збудження (у масштабі струму збудження), яка необхідна для створення ЕРС E_k і компенсації реакції якоря. Знаючи опір якірного кола $R_{я}$, знаходять $E_k = I_{я,к} R_{я} = I_{я,н} R_{я}$ 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 (1) у точці A . Відповідний цій точці струм збудження $i_{3,е} = O_1D$ визначить НС збудження, необхідну для створення E_k . Тоді відрізок $DC = AB$ дасть величину НС реакції якоря $i_{3,я}$ у масштабі струму збудження. Трикутник ABC – характеристичний трикутник генератора, катет BC виражає спад напруги в якірному колі, а катет AB – НС реакції якоря.

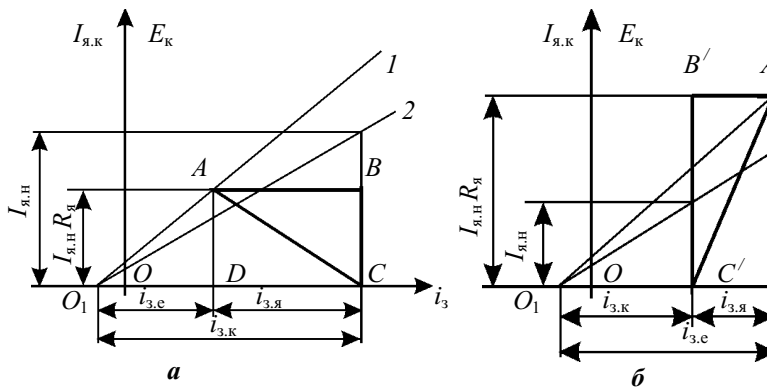


Рис. 1.4

Оскільки в досліді к.з. магнітна система машини не насичена, поперечна реакція якоря впливу на роботу машини практично не робить. Тому катет AB визначається тільки подовжньою реакцією якоря, дія якого залежить від положення щіток. Якщо щітки знахо-

дяться в нейтралі, подовжня реакція якоря відсутня і катет AB вироджується в точку (трикутник стає просто вертикальним відрізком BC).

При зсуві щіток із нейтралі в напрямку обертання якоря подовжня реакція буде розмагнічувати ($i_{3,к} > i_{3,е}$). Цьому випадку відповідає характеристичний трикутник на рис. 1.4,а. При зсуві щіток в інший бік подовжня реакція якоря намагнічує ($i_{3,к} < i_{3,е}$) і трикутник розгорнеться в положення $A'B'C'$ (див. рис. 1.4,б).

3.3. При навантаженні генератора напруга на його затискачах 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 (приведений до стандартної температури 75 °С). Таким чином, навантажувальна характеристика (суцільна лінія на рис. 1.5,а) відрізняється від характеристики холостого ходу внаслідок спаду напруги в колі якоря і дії реакції якоря. У залежності від характеру дії реакції якоря навантажувальна характеристика може проходити нижче від характеристики холостого ходу (при реакції, що розмагнічує) або вище від неї (при реакції, що намагнічує). Як правило, реакція якоря має характер розмагнічування.

Розрахункова навантажувальна характеристика будується

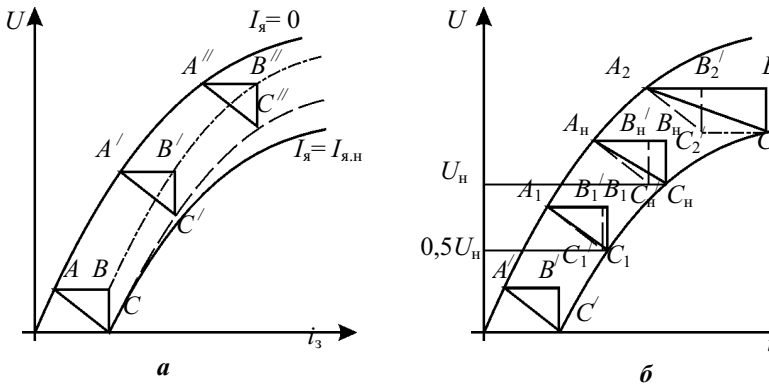


Рис. 1.5

шляхом пересування характеристичного трикутника з початкового положення ABC , що відповідає режиму к.з., вершиною A вздовж характеристики холостого ходу паралельно самому собі. Тоді вершина C опише навантажувальну характеристику генератора (пунктирна лінія на рис. 1.5,а), а вершина B – внутрішню навантажувальну характеристику $E = f(i_3)$. Проте розрахункова і дослідна навантажувальні характеристики будуть різнитися тим більше, чим більший струм збудження, тому що трикутник ABC , отриманий із характеристик холостого ходу і короткого замикання, не враховує дії розмагнічування поперечної реакції якоря, що зростає в міру насичення магнітної системи.

Для побудови розрахункової зовнішньої і регулювальної характеристик варто визначити характеристичний трикутник, що враховує дію поперечної реакції якоря при насиченні магнітної системи. Для цього використовують дослідну 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 реакції якоря (див. рис. 1.5,б). Зіставляючи трикутник $A_n B_n C_n$ із трикутником $A_n B'_n C'_n = A'B'C'$, що був отриманий із характеристик холостого ходу і короткого замикання, можна виділити НС подовжньої і поперечної реакцій якоря.

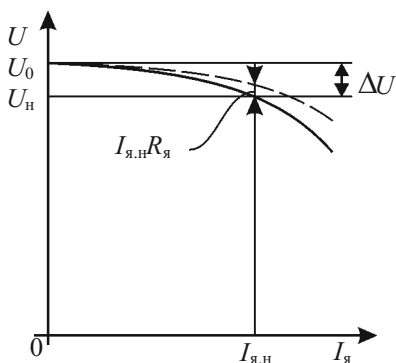


Рис. 1.6

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

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

За зовнішньою характеристикою визначають номінальну зміну напруги генератора:

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

де U_n – 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 у першому квадранті координатної площини, а в другому квадранті будують зовнішню характеристику (рис. 1.7).

Точку D_n зовнішньої характеристики, що відповідає номінальному режиму, одержують перенесенням точки C_n у другий квадрант з абсцисою, яка дорівнює номінальному струму якоря $I_{я.н}$. Точку холостого ходу D_0 знаходять перенесенням із характеристики холостого ходу на вісь ординат точки A_0 , що відповідає номінальному струму збудження $i_{з.н}$. Проміжні струми зовнішньої характеристики одержують, задавши значенням струму якоря, наприклад $I_{я} = 0,5I_{я.н}$. Тоді катети AB і BC характеристичного трикутника, пропорційні струму якоря, і весь трикутник у цілому зменшується вдвічі, причому його вершина A_1 , як і раніше, буде лежати на характеристиці холостого ходу, а катет $B_1 C_1$ на прямій $A_0 C_k$.

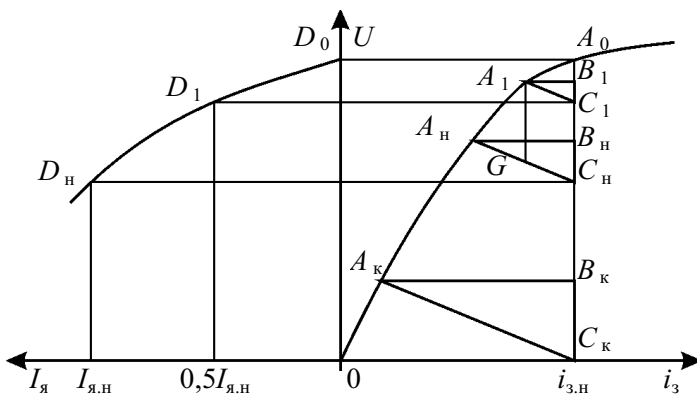


Рис. 1.7

Для побудови цього трикутника поділяють навпіл гіпотенузу трикутника $A_n C_n$ 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 $A_n C_n$ відкладають відрізок $A_1 C_1 = 0,5 A_n C_n$, одержуючи точку C_1 , що переносять у другий квадрант, і знаходять точку D_1 з 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 D_k визначиться положенням трикутника $A_k B_k C_k$. Вершини B і C характеристичних трикутників для всіх струмів навантаження лежать на прямій $A_0 C_k$, тому що зовнішня характеристика визначається незмінним значенням струму збудження $i_{з.н} = OC_k$.

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

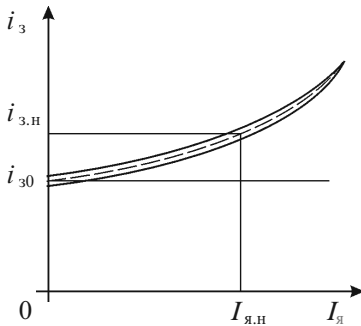


Рис. 1.8

Унаслідок гістерезису висхідної і спадної гілок регулювальні характеристики різняться. За практичну характеристику беруть середню. За нею знаходять номінальну зміну струму збудження:

Розрахункову регулювальну характеристику будують у четвертому

$$\Delta i_z = [(i_{з.н} - i_{з0}) / i_{з.н}] \cdot 100 \% .$$

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

Точку номінального режиму F_n будують за номінальними значеннями струму якоря і струму збудження. Точку $F_0 (OF_0 = i_{з0})$ одержують перенесенням на вісь абсцис із характеристики холостого ходу точки A'_0 , що 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 $A_n C_n$ (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 $A'_1 C'_1 =$

$0,5A_n C_n$ паралельно $A_n C_n$, знаходять точку C'_1 , що переносять у четвертий квадрант з абсцисою $I_{я} = 0,5I_{я.н}$, одержуючи точку F_1 регульовальної характеристики.

Аналогічно будують точки для струмів якоря, рівних $0,25I_{я.н}$; $0,75I_{я.н}$; $1,25I_{я.н}$.

Запитання для самоконтролю

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

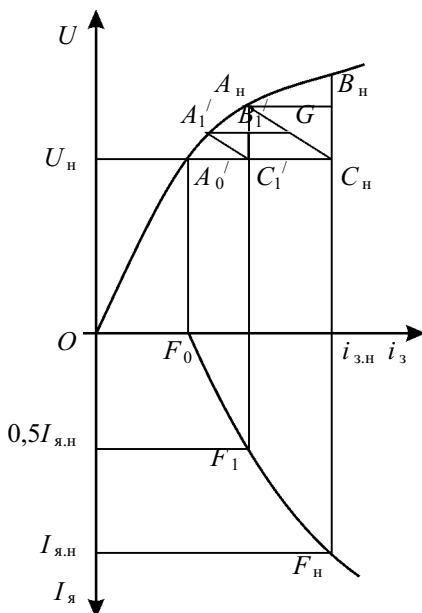


Рис. 1.9

Робота № 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЕЛЬНОГО І ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

1. Обсяг роботи

1.1. Випробувати генератор паралельного збудження (послідовна обмотка відключена): зняти і побудувати характеристику холостого ходу при самозбудженні; визначити дослідним і розрахунковим шляхом критичний опір кола паралельної обмотки збудження $R_{кр}$; зняти і побудувати навантажувальну, зовнішню та регульовальну характеристики генератора.

1.2. Випробувати генератор змішаного збудження: зняти і по-

будувати навантажувальну, регульовальну та зовнішню характеристики при згідному і зустрічному вмиканні послідовної обмотки збудження.

1.3. Порівняти навантажувальні, зовнішні і регульовальні характеристики генераторів паралельного та змішаного збудження.

1.4. Побудувати зовнішню характеристику генератора паралельного збудження за характеристикою холостого ходу і характеристичним трикутником. Порівняти з дослідною.

1.5. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

2.1. Схема для випробування генератора паралельного збудження зображена на рис. 2.1 (послідовну обмотку збудження потрібно відключити).

Генератор приводиться в обертання синхронним двигуном, що вмикається в мережу змінного трифазного струму. Після пуску двигуна необхідно за показниками тахометра переконатися в тому, що ротор двигуна досяг підсинхронної частоти обертання

(приблизно $0,95n_n$), після чого подати живлення в коло збудження двигуна і за допомогою реостата встановити номінальне значення струму збудження. Самозбудження генератора перевіряють за показниками вольтметра й амперметра в колі збудження. Якщо вольтметр

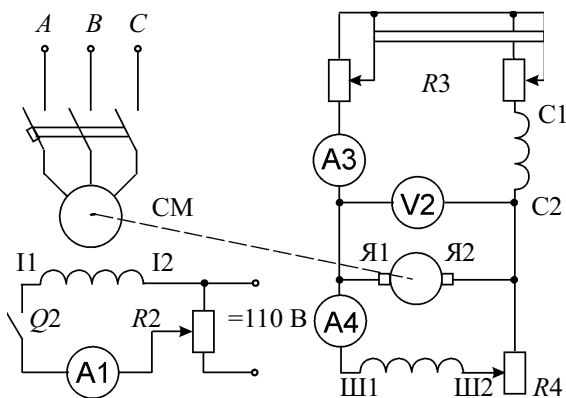


Рис. 2.1

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 рівні нулю) необхідно намагнітити магнітне коло генератора, подавши напругу на обмотку збудження від незалежного джерела живлення.

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 $U_0 = 1,2U_{\text{н}}$, а потім, зменшуючи його, знімають п'ять-шість точок до $i_3 = 0$.

2.2. Критичний опір кола паралельної обмотки збудження $R_{\text{кр}}$ визначають при частоті обертання $n = n_{\text{н}}$. Для цього при холостому ході генератора опір регульовального реостата в колі паралельної обмотки збудження зменшують настільки, щоб генератор самозбудився до напруги $U = (0,5 \dots 1,0)U_{\text{н}}$. Потім опір реостата поступово збільшують, при цьому необхідно спостерігати за зменшенням напруги. Положення реостата, при якому на затискачах генератора ще збуджується найменша напруга, відмінне від напруги залишкового магнетизму, буде відповідати дослідному значенню критичного опору кола збудження

$$R_{\text{кр}} = R'_3 + R_3,$$

де R'_3 , R_3 – опори обмотки збудження і регульовального реостата.

Величина опору $R_{\text{кр}}$ вимірюється методом амперметра-вольтметра. Для цього паралельне коло збудження генератора, що складається з обмотки збудження, регульовального реостата й амперметра, відключають від затискачів обмотки якоря і підключають до мережі постійного струму $U_{\text{м}} = 110 \text{ В}$.

2.3. Зовнішню характеристику $U = f(I_{\text{я}})$ знімають при $R_3 = \text{const}$. Спочатку встановлюють точку номінального навантаження: $U = U_{\text{н}}$, $n = n_{\text{н}}$, $I = I_{\text{н}}$. Для неї визначають номінальний струм збудження із н і відповідний йому опір кола збудження $R_{3, \text{н}} = U_{\text{н}} / i_{3, \text{н}}$. Дані досліду заносять у табл. 2.1.

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. 2.1.

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. 2.1.

Таблиця 2.1

№ п/п	U, В	I	I ₃	n, об/хв
		А		
1				
...				

2.4. Схема випробувань генератора змішаного збудження наведена на рис. 2.1.

Випробування здійснюється для двох випадків вмикання послідовної обмотки стосовно паралельної: згідного і зустрічного. В обох випад-

ках знімаються такі характеристики: навантажувальна $U = f(i_3)$ при $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}} = \text{const}$, $n = n_{\text{н}} = \text{const}$; регулювальна $i_3 = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{н}} = \text{const}$, $n = n_{\text{н}} = \text{const}$; зовнішня $U = f(I_{\text{я}})$ при $R_3 = \text{const}$, $n = n_{\text{н}} = \text{const}$.

Методика зняття характеристик і межі регулювання такі ж, як і для генератора паралельного збудження. Дані випробувань заносять у табл. 2.1.

3. Обробка результатів випробувань

Усі види характеристик генератора при паралельному і змішаному збудженні наводять у звіті на окремих рисунках.

3.1. Графічно знаходять значення $R_{\text{кр}}$ 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 $n = n_{\text{н}}$, пропорційно заданій частоті. Порівнюють значення $R_{\text{кр}}$, знайдені графічним і дослідним шляхом.

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

Побудова характеристики (рис. 2.2) здійснюється так само, як і для генератора незалежного збудження (див. 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 $\text{tg} \alpha = R_3 = U_{\text{н}}/i_{3\text{н}}$ ($R_{3\text{н}}$ визначається з досліду п. 1.1). Характеристика холостого ходу $U = f(i_{3\text{н}})$ подана на рис. 2.2 кривою OA_0 .

Побудову характеристичного трикутника $A_{\text{н}} B_{\text{н}} C_{\text{н}}$ для $I = I_{\text{н}}$ виконують у такому порядку:

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

вирахувавши спад напруги в колі якоря генератора $B_n C_n = I_n R_{я}$, відкладають відрізок $B_n C_n$ паралельно осі ординат та одержують точку B_n ;

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

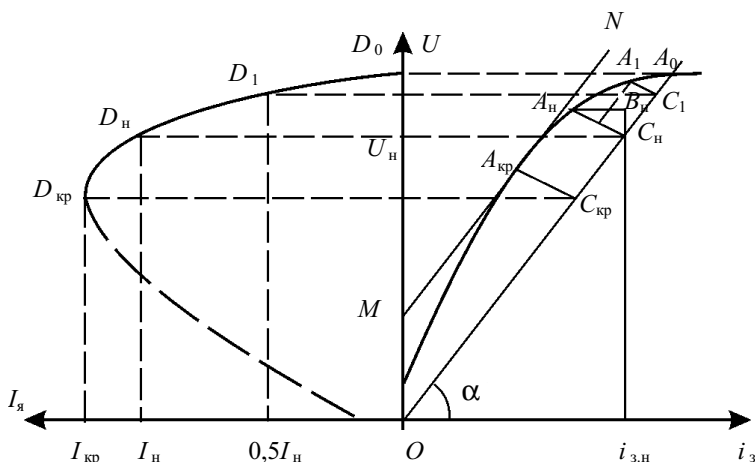


Рис. 2.2

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 $I = 0,5I_n$, через середину гіпотенузи характеристичного трикутника проводять пряму, яка паралельна $A_0 O$, до перетину з характеристикою холостого ходу в точці A_1 . Точка A_1 – вершина характеристичного трикутника, який відповідає $I = 0,5I_n$. 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 $I = 0,5I_n$, утворить точку зовнішньої характеристики при $I = 0,5I_n$.

Для одержання критичного струму $I_{кр}$ необхідно провести дотичну MN до характеристики холостого ходу паралельно OA_0 і з точки дотику $A_{кр}$ побудувати відрізок $A_{кр} C_{кр}$, паралельний гіпоте-

нузі характеристичного трикутника $A_n C_n$. Тоді

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

Запитання для самоконтролю

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

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 двох значень струму збудження (більшого і меншого від 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_a , n , $\eta = f(R_d)$.
- 1.4. Зробити регулювання частоти обертання двигуна зміною струму збудження. Розрахувати і побудувати залежності I_a , n , $\eta = f(R_d)$.
- 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 $I_d = U/R_{\text{я}}$, де U – напруга мережі; $R_{\text{я}}$ – опір кола якоря.

При $U = U_n$ струм I_d у десятки разів перевищує номінальний, тому що спад напруги в колі якоря $\Delta U = (0,02 \dots 0,1)U_n$. Тому для обмеження струму в коло якоря вводиться пусковий реостат. Звичайно пусковий опір вибирається такий, щоб початковий пусковий струм $I_{\text{п}} \approx (1,4 \dots 1,7) I_n$.

Увага! Перед пуском двигуна переконайтеся, що ручка пускового реостата 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. Залежності частоти обертання n , моменту обертання M_2 і ККД η від корисної потужності на валу P_2 або від струму якоря двигуна називаються робочими характеристиками.

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження знімають при напрузі мережі $U_m = U_n$, струмі збудження $i_{\text{зд}} = i_{\text{зд.н}} = \text{const}$, що відповідає $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$ при $n = n_n$. Для цього спочатку за допомогою навантажувального генератора і реостата в колі збудження двигуна встановлюють номінальне навантаження двигуна $I_{\text{я}} = I_{\text{я.н}}$ при $n = n_n$. Потім, залишаючи незмінним опір реостата в колі збудження двигуна, змінюють гальмівний момент на валу двигуна в межах від $M_2 = M_n$ до $M_2 = 0$. Дослідні і розрахункові дані записують у табл. 3.1.

2.2. Штучні механічні характеристики знімають при $U = U_n = \text{const}$, $i_{\text{зд}} = i_{\text{зд.н}} = \text{const}$, $R_{\text{дод}} = \text{const}$ для двох значень $R_{\text{дод}}$, підбра-

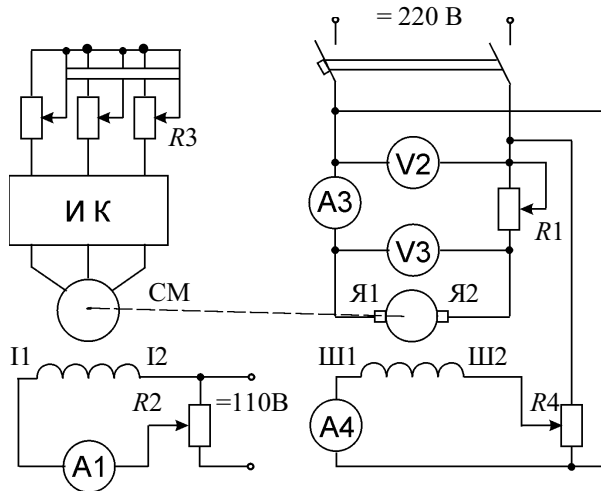


Рис. 3.1

них так, щоб при $M_2 = M_n$ частота обертання двигуна знаходилася в діапазоні $n = (0,7...0,9)n_n$ і $n = (0,4...0,6)n_n$.

Таблиця.3.1

№ п/п	Дослідні дані							Розрахункові дані			
	$U_з$, В	$I_д$	$i_{з.д}$	$U_г$, В	$I_г$	$i_{з.г}$	n , об/хв	P_1	P_2	M_2 , Н·м	η
								ВТ			
		А			А						
1											
...											

Номінальний момент двигуна встановлюють за номінальним струмом якоря. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від $M_2 = M_n$ до $M_2 = 0$. Дослідні дані записують у табл. 3.2.

Таблиця.3.2

№ п/п	Дослідні дані							Розрахункові дані			
	U_3	I_d	$i_{3.д}$	U_r	I_r	$i_{3.г}$	n , об/хв	P_1	P_2	M_2	η
	В	А		В	А			Вт	Н·м		
	1										
...											

Механічні характеристики знімають при $U = U_n = \text{const}$, $i_{з.д} = \text{const}$ для двох значень струму збудження: $i_{з.д} = (1,1...1,2)i_{з.д.н}$ та $i_{з.д} = (0,7...0,8)i_{з.д.н}$.

Момент навантаження двигуна встановлюють за номінальним струмом якоря. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від моменту, що відповідає $I_{я.н}$, до $= 0$. Дослідні дані записують у табл. 3.2.

Механічна характеристика при половинній напрузі на якорі двигуна. Двигун вмикають у мережу з напругою $U = 0,5U_n$, при цьому за допомогою реостата встановлюють струм у колі збудження $i_{з.д} = i_{з.д.н}$. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від $M_2 = M_n$ до $M_2 = 0$. Дослідні дані записують у табл. 3.2.

2.3. Регулювання частоти обертання двигуна зміною опору реостата в колі якоря роблять при $U_m = U_n = \text{const}$, $i_{з.д} = i_{з.д.н} = \text{const}$ і номінальному моменті на валу двигуна. Спочатку навантажують двигун на номінальну потужність ($U = U_n$, $I_d = I_{д.н}$, $n = n_n$), записуючи струм збудження і струм якоря навантажувального ге-

нератора, який при проведенні досліду підтримують постійним. Вводячи реостат у коло якоря двигуна, знімають п'ять-шість точок при зміні частоти обертання від $n = n_n$ до $n \approx (0,1...0,2)n_n$. Дослідні дані заносять у табл. 3.2.

2.4. Регулювання частоти обертання двигуна зміною струму збудження роблять при $U_m = U_n = \text{const}$ і $M_2 = M_n = \text{const}$.

Двигун навантажують номінальною потужністю при $I_d = I_{д.н'}$, $n = n_n$, $i_{з.д} = i_{з.д.н}$. Потім, записавши струм якоря I_γ і струм збудження $i_{з.г}$ навантажувального генератора, який при проведенні досліду підтримують постійним, регулюють струм збудження двигуна, змінюючи його частоту обертання нагору від номінальної до $n = 1,2n_n$ і вниз від $n = n_n$ до n , що відповідає $i_{з.д} = 1,2i_{з.д.н}$. Дослідні і розрахункові дані заносять у табл. 3.2.

3. Обробка результатів випробувань

Характеристики двигуна паралельного збудження розраховують за такими формулами:

споживана з мережі потужність $P_1 = U_m(I_\gamma + i_{з.д})$;

корисна потужність на валу двигуна $P_2 = P_1 - p_R - \sum p$;

момент на валу двигуна $M_2 = \frac{P_2}{2\pi n}$;

ККД двигуна $\eta = \left(1 - \frac{\sum p + p_R}{P_1}\right) \cdot 100\%$.

Тут $\sum p = p_e + p_0 + p_{щ} + p_{дод}$ – сумарні втрати; $p_R = I_\gamma^2 R_{дод}$ – втрати в додатковому опорі в колі якоря двигуна; $p_e = I_\gamma^2 R_\gamma$ – електричні втрати в обмотках кола якоря; p_0 – втрати холостого ходу (механічні, магнітні і на збудження), що задаються кривою для конкретної машини; $p_{щ} = 2I_\gamma \Delta U_{щ} \approx 2I_\gamma$ – електричні втрати в щітковому контакті ($\Delta U_{щ} = 1$ В); $p_{дод} = (I_d / I_{д.н})^2 \cdot 0,01 P_n$ – додаткові втрати; p_2 – корисна потужність на валу, Вт; n – частота обертання, об/с.

Пояснення до результатів випробувань

1. Робочими характеристиками двигунів паралельного збудження називаються залежності $P_1, I_d, M, n, \eta = f(P_2)$ при $U_m = U_n, i_{3,d} = i_{3,d,n} = \text{const}$. Дуже близькі до цих залежностей характеристики $P_1, M, n, \eta = f(I_d)$ при $U_m = U_n, i_{3,d} = i_{3,d,n} = \text{const}$ (рис. 3.2 і 3.3.).

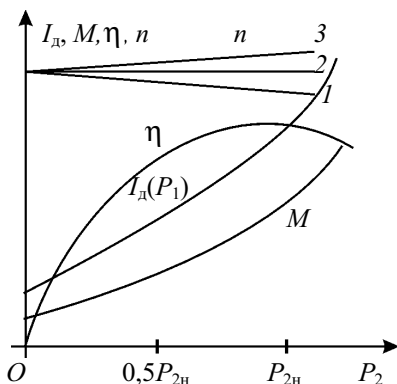


Рис. 3.2

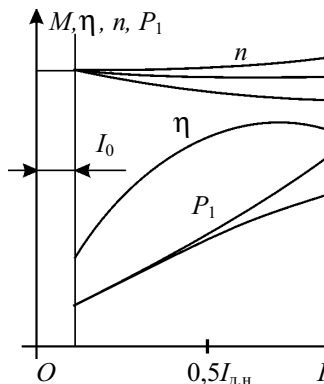


Рис. 3.3

Залежність струму якоря $I_d = f(P_2)$ визначають з виразу для електромагнітної потужності

$$P_{\text{ем}} = P_2 + p_0 = M \cdot 2\pi n = 2\pi c_m \Phi n I_d,$$

де p_0 – втрати холостого ходу; Φ – потік при навантаженні, що складається зі струму збудження і струму реакції якоря.

Таким чином,

$$I_d = \frac{P_2}{c'_m \Phi n} + \frac{P_0}{c'_m \Phi n} = I_2 + I_0,$$

де I_0 – струм холостого ходу;

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

Залежність $n = f(P_2)$ визначається рівнянням ЕРС ($U = E + I_{\text{д}} R_{\text{я}} = c_{\text{с}} n \Phi + I_{\text{д}} R_{\text{я}}$)

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

Оскільки $U_{\text{м}} = U_{\text{н}} = \text{const}$ та $i_{\text{з.д}} = \text{const}$, то на частоту обертання 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 3.3 зображені залежності $n = f(P_2)$ і $n = f(I_{\text{д}})$ для трьох випадків:

переважає спад напруги $I_{\text{д}} R_{\text{я}}$ (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 $I_{\text{д}}$, а в більшому ступені. Тому всі швидкісні характеристики мають опуклість у бік осі абсцис. Звичайна форма швидкісної характеристики двигуна паралельного збудження – падаюча швидкісна характеристика (крива 1 на рис. 3.3).

Моментна характеристика $M = f(I_{\text{д}})$ при $U_{\text{м}} = U_{\text{н}} = \text{const}$ і $i_{\text{з.д}} = i_{\text{з.д.н}} = \text{const}$, як це впливає з формули $M = c_{\text{м}} I_{\text{д}} \Phi$, повинна бути прямолінійна, але через дію реакції розмагнічування якоря результуючий потік зменшується. Залежність $M = f(I_{\text{д}})$ має опуклість нагору, тому що момент зростає повільніше від струму.

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

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

$$\sum p = p_0 + \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}.$$

Тоді ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{U(I_{\text{я}} + i_3) - (p_0 + \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}})}{U(I_{\text{я}} + i_3)}.$$

Нехтуючи струмом збудження в знаменнику, одержуємо

$$\eta \approx 1 - \frac{p_0}{UI_{\text{я}}} - \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{U} - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{U}.$$

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 утрати холостого ходу і η буде зменшуватися майже пропорційно струму якоря.

Максимум ККД настає при рівності втрат холостого ходу і втрат, що залежать від квадрата

струму: $P_{\text{е}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$.

2. Механічні характеристики $n = f(M)$ подані на рис. 3.4. Механічна 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 впливає

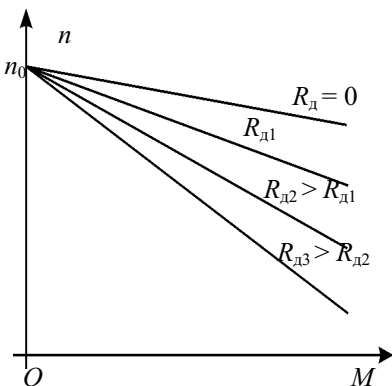


Рис. 3.4

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c_{\text{е}} \Phi}.$$

Оскільки $I_{\text{я}} = M / c_{\text{м}} \Phi$, $n = \frac{U}{c_{\text{е}} \Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c_{\text{е}} c_{\text{м}} \Phi^2} = n_0 - \Delta n$, де n_0 –

частота обертання двигуна при холостому ході; Δn – зменшення частоти обертання відповідно моменту й опору кола якоря $R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$.

При $i_3 = \text{const}$ і $\Phi = \text{const}$ механічні характеристики двигуна являють собою прямі лінії, нахил яких відносно осі абсцис визна-

чається співвідношенням

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{U}.$$

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 має ДПС?

Робота № 4

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

1. Обсяг роботи

1.1. Зняти, розрахувати і побудувати робочі характеристики при згідному 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, що відмінний 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 реостата. Навантаженням двигуна є синхронний генератор, що, у свою чергу, працює на навантажувальні опори.

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

Спочатку розраховують номінальне значення струму збудження паралельної обмотки $i_{3,ш.н}$. Для цього відключають послідовну

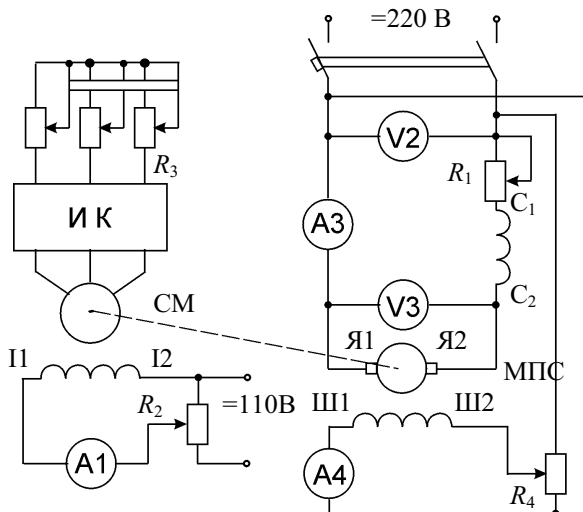


Рис. 4.1

обмотку збудження, запускають двигун і за допомогою навантажувального генератора та реостата в колі збудження двигуна встановлюють номінальне навантаження двигуна $I_{я} = I_{н}$ при $n = n_{н}$. Цьому навантаженню відповідає номінальне значення струму збудження паралельної обмотки $i_{3,ш.н}$.

Визначивши номінальне значення струму збудження

паралельної обмотки, двигун вимикають від мережі. Підключивши в коло якоря двигуна послідовну обмотку збудження, знову роблять пуск двигуна, навантажують його до $I_{я} = I_{я.н}$ при $i_{3,ш} = i_{3,ш.н}$ та знімають робочі характеристики, змінюючи гальмівний момент на валу від M_2 , що відповідає $I_{я.н}$, до $M_2 = 0$. Дослідні і розрахункові дані записують у табл. 4.1.

2.2. Штучні механічні характеристики $n = f(M)$ знімаються при згідному і зустрічному вмиканні послідовної обмотки збудження.

Механічні характеристики при введенні в коло якоря додаткових опорів знімають при $U_{м} = U_{н} = \text{const}$, $i_{3,ш} = i_{3,ш.н} = \text{const}$, $R_{я} + R_{\text{дод}} = \text{const}$ для двох значень $R_{\text{дод}}$, підібраних так, щоб при $M_2 = M_{н}$ частота обертання двигуна знаходилася в діапазонах $n = (0,7 \dots 0,9)n_{н}$ і $n = (0,4 \dots 0,6)n_{н}$. Номінальний момент двигуна орієнтовно встановлюють за номінальним струмом якоря. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від $M_2 = M_{н}$ до $M_2 = 0$. Дослідні дані записують у табл. 4.1.

Механічні характеристики для неномінального струму збуд-

ження знімають. при $U_m = U_n = \text{const}$, $i_{3,ш} = \text{const}$ для струму збудження $i_{3,ш} = (1, 1 \dots 1, 2) i_{3,ш,н}$.

Момент навантаження двигуна встановлюють за номінальним струмом якоря. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від моменту, що відповідає $I_{я,н}$, до $M_2 = 0$. Дослідні дані записують у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

№ п/п	Дослідні дані							Розрахункові		
	$U_{дв}$	$I_{д}$	$i_{3,ш}$	$U_{г}$	$I_{г}$	$i_{3,г}$	n ,	P_1	P_2	M_2 ,
	В	А		В	А		об/хв	Вт		Н·м
1										
...										

3. Для зняття механічних характеристик при половинній напрузі на якорі двигуна останній вмикають у мережу з напругою $U_m = 0,5U_n$. При цьому за допомогою реостата в колі паралельної обмотки збудження встановлюють струм збудження $i_{3,ш} = i_{3,ш,н}$. Гальмівний момент на валу двигуна змінюють у межах від M_2 , що відповідає $I_{я} = I_{я,н}$, до $M_2 = 0$. Дослідні дані записують у табл. 4.1.

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. Що таке перекидання магнітного поля двигуна?
3. Як відбувається реостатний пуск двигуна?
4. Що буде з двигуном змішаного збудження, у якого обмотки

збудження включені узгоджено, якщо розімкнути коло обмотки паралельного збудження?

5. Як зовнішньо відрізняються паралельна і послідовна обмотки збудження?

Робота № 5

ВИПРОБУВАННЯ ТРИФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Обсяг роботи

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

1.2. За даними дослідів холостого ходу визначити коефіцієнт трансформації, струм і втрати холостого ходу при номінальній напрузі; побудувати характеристики холостого ходу і розрахувати його параметри.

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

1.4. За даними дослідів холостого ходу і трифазного короткого замикання розрахувати і побудувати залежність процентної зміни напруги трансформатора від струму навантаження $\Delta U\% = f(I_2)$ при заданому $\cos\varphi_2$; розрахувати і побудувати криву залежності ККД трансформатора від корисної потужності $\eta = f(P_2)$ при заданому $\cos\varphi_2$; визначити параметри і побудувати заступну схему трансформатора.

1.5. За даними дослідів навантаження побудувати точну векторну діаграму трансформатора для режиму з $I_1 \approx I_{1н}$; побудувати дослідну залежність $U_{2л} = f(I_2)$; розрахувати і побудувати залежність $U_{2л} = f(I_2)$ за допомогою спрощеної векторної діаграми для заміщеного трансформатора та порівняти її з дослідною.

1.6. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

Схеми випробування трансформатора наведені на рис. 5.1.

Для плавної зміни напруги на первинній обмотці трансформатор підключається до мережі через автотрансформатор.

2.1. Дослід холостого ходу здійснюється при розімкнутій вторинній обмотці трансформатора.

Змінюючи за допомогою автотрансформатора первинну напругу в межах від $U_{1л} = (1,1 \dots 1,2) U_n$ до $U_{1л} = (0,4 \dots 0,5) U_n$, 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.

2.2. При трифазному короткому замиканні вторинна обмотка трансформатора замикається накоротко. На відміну від експлуатаційного к.з., у даному досліді, щоб уникнути протікання в обмотках надмірно великих струмів, напруга, яка підводиться до трансформатора, повинна бути значно нижчою від номінальної: $U_{1к} = (0,03 \dots 0,15) U_n$. Таким чином, перед початком дослідження короткого замикання необхідно переконаватися, що подана на трансформатор напруга близька до нуля. Потім вторинну обмотку замикають і збільшують напругу, поки струм в обмотках не досягне значень $(1,1 \dots 1,2) I_n$. Далі, зменшуючи напругу до можливого мінімуму, знімають п'ять-шість точок, записуючи відповідні по-

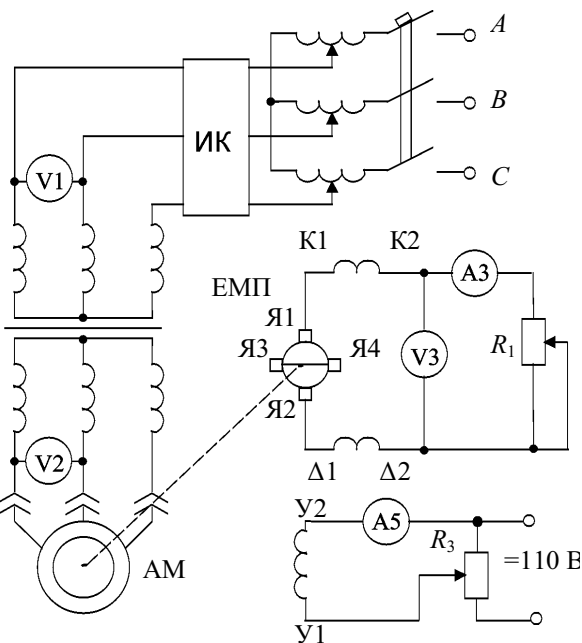


Рис. 5.1

казання приладів у табл. 5.1. По закінченні досліду короткого замикання перемички на клеммах вторинної обмотки трансформатора *необхідно зняти!*

Таблиця. 5.1

№ п/п	$U_{1л}$	$U_{2л}$	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C
	В		А			Вт		
1								
...								

2.3. Навантаження трансформатора здійснюється за допомогою асинхронного двигуна порівнянної потужності, який з'єднаний з генератором постійного струму, що навантажується на реостат. Номінальна напруга двигуна відповідає номінальній вторинній напрузі трансформатора.

Щоб уникнути пошкодження вимірювальних приладів, пуск асинхронного двигуна варто робити вхолосту, тобто при розімкненому колі якоря і відключеному збудженні генератора постійного струму, і здійснювати плавним збільшенням напруги, яка підводиться до трансформатора, так, щоб пусковий струм протягом усього процесу пуску не перевищував $(1,2...1,4)I_n$ трансформатора.

Коли агрегат досягне номінальної швидкості, подають збуд-

ження на генератор і навантажують його на реостат. Знімають декілька точок і записують показання приладів у табл. 5.2, де $U_{я}$, $I_{я}$ – напруга і струм якоря генератора постійного струму.

Таблиця 5.2

№ п/п	I_A	I_B	I_C	$U_{1л}$	$U_{2л}$	P , Вт	$U_{я}$, В	$I_{я}$, А
	А			В				
1								
...								

3. Обробка результатів випробувань

3.1. Холостий хід трансформатора. Коефіцієнт трансформації визначається відношенням фазних ЕРС первинної і вторинної об-

моток трансформатора:

$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{W_1}{W_2}.$$

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

$$k = U_{1л}/U_{2л}.$$

При однаковій схемі з'єднання первинної і вторинної обмоток (Y/Y або Δ/Δ) фазний і лінійний коефіцієнти трансформації рівні, при різноманітних схемах з'єднання вони відрізняються в $\sqrt{3}$ разів. За даними п. 3.1 обчислюють значення k і заносять у табл. 5.3, а потім визначають його середнє арифметичне значення; розраховують також струм холостого ходу I_0 , потужність холостого ходу P_0 і коефіцієнт потужності холостого ходу $\cos\phi_0$.

Таблиця 5.3

№ п/п	$U_{1л}$	$U_{2л}$	k	$I_0,$ A	$P_0,$ B_T	$\cos\varphi_0$	z_0	r_0	x_0
	B						OM		
1									
...									

У трифазних тристрижневих трансформаторів 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.

Потужність розраховують як суму потужностей у фазах:

$$P_0 = P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}.$$

Коефіцієнт потужності визначають за формулою

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

Результати обчислень заносять у табл. 5.3 і за цими даними будують характеристики холостого ходу $I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_1)$, з яких знаходять значення струму $I_{0н}$, потужності $P_{0н}$ і $\cos\varphi_{0н}$, що відповістей подано на рис. 5.2.

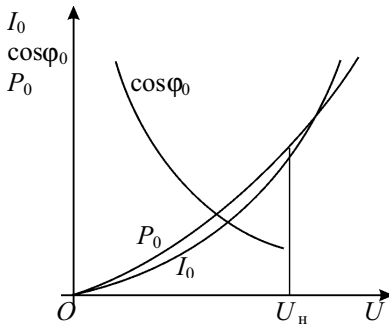


Рис. 5.2

Струм холостого ходу виражають у відсотках від номінального струму трансформатора:

$$I_{0н\%} = (I_{0н}/I_n) \cdot 100 \%.$$

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

При заданій частоті f втрати в сталі $p_c \equiv B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_{1ф}^2 \approx U_{1ф}^2$, 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 $z_0 = r_0 + jx_0 = \dot{U}_{1ф}/\dot{I}_0$, що розраховуються за формулами:

$$z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}I_0}; r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Результати цих розрахунків також заносять у табл. 5.3.

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

$$i_k \approx \frac{\dot{U}_{1k}}{z_1 + z_2'} = \frac{\dot{U}_{1k}}{z_k} = \frac{\dot{U}_{1k}}{r_k + jx_k}$$

де U_{1k} – фазна напруга, яка підводиться до первинної обмотки; r_k , x_k , z_k – параметри короткого замикання.

У режимі короткого замикання напруга мала; таким чином, невеликий і магнітний потік ($U_{1\phi} \cong \Phi_m$). 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 розраховують значення $U_k, I_k, P_k, \cos\varphi_k$ і заносять у табл. 5.4. При цьому струм I_k і напругу U_k беруть середніми за трьома фазами, а потужність короткого замикання $P_k = P_{kA} + P_{kB} + P_{kC}$.

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_k = P_k / (\sqrt{3} U_k I_k)$.

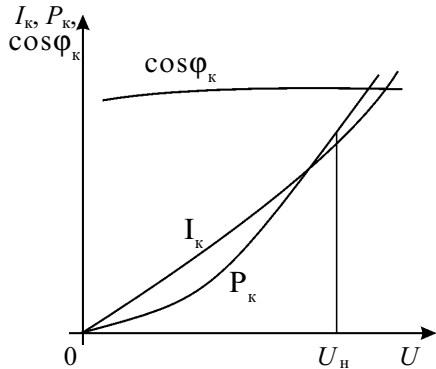


Рис. 5.3

Таблиця 5.4

№ п/п	U_k , В	I_k , А	P_k , Вт	$\cos\varphi_k$	z_k	r_k	x_k
					Ом		
1							
...							

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

$$z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_k}; \quad r_k = \frac{P_k}{3I_k^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2};$$

при з'єднанні трикутником:

$$z_k = \frac{\sqrt{3}U_k}{I_k}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Результати заносять у табл. 5.4.

За характеристиками короткого замикання знаходять напругу $U_{к.н.}$, потужність $P_{к.н.}$ і коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{к.н.}$, які відповідають номінальному струму короткого замикання, та визначають у відсотках напругу короткого замикання і її активну й реактивну складові:

$$u_{к.н\%} = \frac{I_n z_k}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{U_{к.н.}}{U_n} \cdot 100 \%;$$

$$u_{ка\%} = \frac{I_n r_k}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{P_{к.н.}}{U_n I_n} \cdot 100 \% = \frac{P_{к.н.}}{S_n} \cdot 100 \%;$$

$$u_{кр\%} = \frac{I_n x_k}{U_n} \cdot 100 \% = \sqrt{u_{к.н.}^2 - u_{ка}^2}.$$

3.3. Відсоткова зміна напруги трансформатора визначається розрахунковим шляхом:

$$\Delta u_{\%} = (u_{ка\%} \cos\varphi_2 + u_{кр\%} \sin\varphi_2) k_{н.г},$$

де $k_{н.г} = I_2 / I_{2н}$ – коефіцієнт навантаження трансформатора; $\cos\varphi_2$ – коефіцієнт потужності вторинного кола.

Задаючись при визначеному $\cos\varphi_2$ рядом значень $k_{н.г}$ у межах від 0 до 1,5 (наприклад, 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25), одержують залежність або в іншому масштабі $\Delta u_{\%} = f(I_2)$. Результати слід навести в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

№ п/п	$k_{н.г}$	P_2	$P_{0н}$	$k_{н.г}^2 P_{к.н}$	$P_{0н} + k_{н.г}^2 P_{к.н}$	P_1	η	$\Delta u_{\%}$
1								
...								

Значення $\cos\varphi$ при розрахунках беруть відповідно до номера бригади з табл. 5.6.

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

Таблиця.5.6

№ п/п	1	2	3	4	5
$\cos\varphi$	0,95	0,90	0,80	0,75	0,70

$$\eta = P_2 / P_1 .$$

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 побічно – методом окремих утрат. Оскільки $P_1 = P_2 + p_c + p_m$, то

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

Утрати в міді при номінальному струмі $p_m = P_{к.н}$, а при струмі, відмінному від номінального, $p_m = k_{н.г}^2 P_{к.н}$.

Утрати в сталі на холостому ході при номінальній напрузі $p_c = P_{0н}$. Але оскільки при зміні струму навантаження трансфор-

матора в межах до номінального ЕРС $E_{1\phi}$ лише незначно (до 5 %) відрізняється від поданої напруги $U_{1\phi}$, то величини магнітного струму Φ_m , індукції B_m , а отже, і втрати в сталі змінюються дуже мало. Цими змінами можна нехтувати. Таким чином, $p_c = P_{0н} = \text{const}$.

Корисна потужність трансформатора виражається через його номінальну повну потужність

$$P_2 = k_{н.г} S_n \cos \varphi_2 .$$

Тоді

$$\eta = 1 - \frac{P_{0н} + k_{н.г}^2 P_{к.н}}{k_{н.г} S_n \cos \varphi_2 + P_{0н} + k_{н.г}^2 P_{к.н}} .$$

Максимальне значення ККД досягається при $k_{н.г}^2 P_{к.н} = P_{0н}$, тобто коли змінні втрати (втрати в міді) рівні постійним (утратам у сталі).

Результати розрахунку ККД заносять у табл. 5.5, за даними якої будують залежності $\Delta u_{\%} = f(k_{н.г})$ і $\eta = f(k_{н.г})$ – див. рис. 5.4.

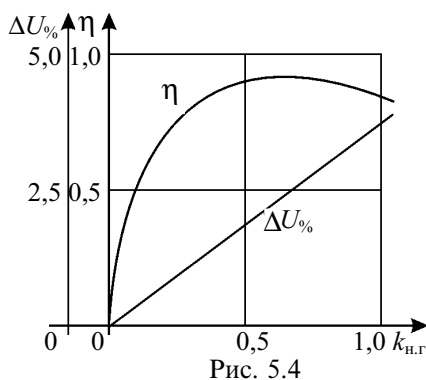


Рис. 5.4

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 $Z_m \approx Z_0$, $r_m \approx r_0$ і $x_m \approx x_0$, де параметри холостого ходу відповідають номінальній первинній напрузі $U_{1н}$.

У режимі короткого замикання $Z_k \approx Z_1 + Z_2^1$, тому $r_1 + r_2' \approx r_k$ і $x_1 + x_2' \approx x_k$, причому приблизно можна взяти $r_1 \approx r_2' = r_k / 2$;

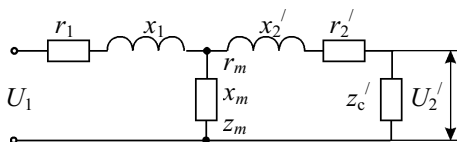


Рис. 5.5

$$x_1 \approx x_2' = x_k / 2 .$$

3.6. Навантаження трансформатора. За результатами дослідів навантаження заповнюється табл. 5.7.

Таблиця 5.7

I_1 , А	$U_{1л}$	$U_{2л}$	P_1 , Вт	$\cos \varphi_1$	$P_я$, Вт	$U_{2л}$, В (розрахунок)
	В					

У таблиці I_1 – середнє за фазами значення струму; P_1 – потужність, яка споживається трансформатором із мережі; $\cos \varphi_1 = P_1 / (\sqrt{3} U_{1л} I_1)$ – коефіцієнт потужності трансформатора в режимі навантаження; $P_я = U_я I_я$ – потужність, що віддається в навантаження генератором постійного струму.

3.7. Побудова 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.

5.6); 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 $\dot{E}_2' = \dot{E}_1'$. Перпендикулярно вектору $\dot{E}_1$ будують вектор магнітного струму в масштабі потокозчеплення

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

За напрямком цього вектора відкладають складову намагнічування струму

холостого ходу $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0н} \sin \varphi_{0н}$ і перпендикулярно їй – активну складову $\dot{I}_{0а} = \dot{I}_{0н} \cos \varphi_{0н}$, одержуючи вектор $\dot{I}_0$. Віднімаючи з нього вектор $\dot{I}_1$, одержують струм $\dot{I}_2'$. Прибудовуючи до кінця век-

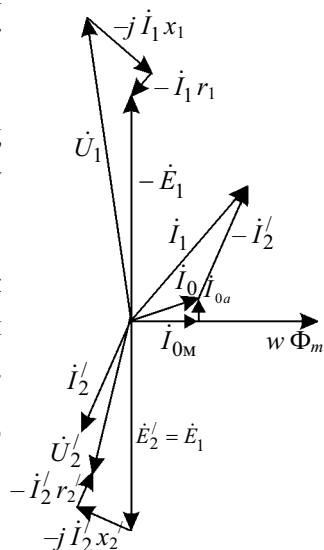


Рис. 5.6

тора $\dot{E}'_2$ спад напруги на активному й індуктивному опорах вторинної обмотки $(-\dot{I}'_2 r'_2 \text{ і } -j\dot{I}'_2 x'_2)$, знаходять вектор вторинної напруги $\dot{U}'_2$.

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

Для побудови розрахункової залежності $U_2 = f(I_2)$ використовують спрощену векторну діаграму заміщеного трансформатора. Вона утворюється з точної, якщо в ній замінити всі вектори, що відносяться до вторинної обмотки, протилежними і нехтувати струмом I_0 . При цьому $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_1$. Побудувавши, як і в попередньому випадку, вектори струму $\dot{I}_1$ і напруги $\dot{U}_1$, до кінця останнього прибудовують трикутник короткого замикання таким чином, щоб його катет $u_{kr} = jI_1(x_1 + x'_2)$ був перпендикулярний вектору струму, а $u_{ka} = I_1(r_1 + r'_2)$ – паралельний (рис. 5.7). У результаті одержують вектор $\dot{U}'_2$. При зміні величини струму сторони трикутника змінюються пропорційно струму.

Перераховуючи значення U'_2 до дійсних, останні заносять в табл. 5.7, а потім будують дослідну і розрахункову криві $U_2 = f(I_1)$ або в іншому масштабі $U_2 = f(I_2)$ – рис. 5.8.

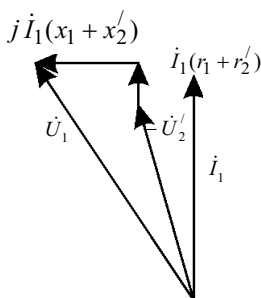


Рис. 5.7

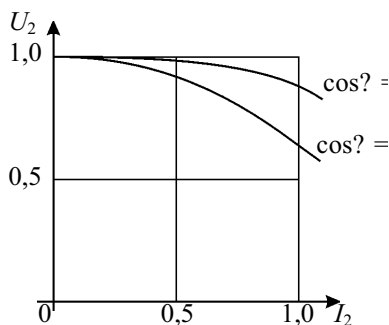


Рис. 5.8

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. Коли трансформатор має максимум ККД?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. *Жерве Г.К.* Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергия, 1984. – 248 с.
3. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
4. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
5. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1972. – Ч. I. – 544 с.
6. *Яцун М.А.* Електричні машини: Навч. посібник. – Л.: Вид-во Державного університету "Львівська політехніка", 1999.

ЗМІСТ

Вступ	3
Вимоги до виконання лабораторних робіт та оформлення звітів.....	4
Загальні вказівки до виконання лабораторних робіт	5
Робота № 1. Характеристики генератора з незалежним збудженням	6
Робота № 2. Характеристики генератора паралельного і змішаного збудження.....	15
Робота № 3. Характеристики двигуна паралельного збудження	20
Робота № 4. Характеристики двигуна змішаного збудження	27
Робота № 5. Випробування трифазного двообмоткового трансформатора	30
Рекомендована література	41

Олег Юрійович КІМСТАЧ
Олександр Павлович КОНОВАЛОВ
Андрій Андрійович СТАВИН

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Частина 1

Електричні машини постійного струму і трансформатори

Під редакцією А.А. Ставинського

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5
Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор М.Д. Белікчі
Комп'ютерна правка Ю.В. Зайцева
Комп'ютерна верстка К.М. Рябенко
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 27.04.01. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 2,4. Обл.-вид. арк. 2,6. Тираж 200 прим.
Вид. № 14. Зам. № 377. Ціна договірна.