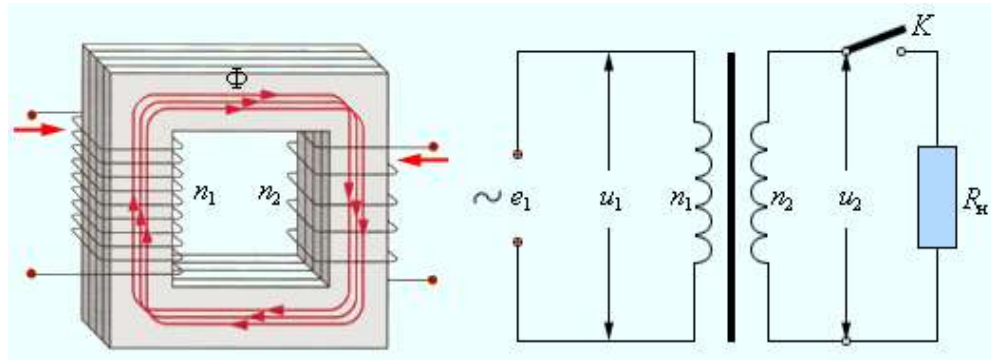


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки з практичних занять

Суми
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки з практичних занять

для студентів 1 с.т., 2 с.т., 3, 4 курсів денної і заочної форм навчання

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

**Суми
2023**

УДК – 5150-(075.8)
ББК 22.151.3 Р-99

Укладачі: Рясна О.В., старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ / Методичні вказівки з практичних занять для студентів 1 с.т., 2 с.т., 3, 4 курсів денної і заочної форм навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Суми, 2023 рік, 70 ст., рис. 20, табл.20, бібл. 8, др. арк. 2,9.

В методичних вказівках наведені всі теми практичних занять і задачі з прикладами розв'язків та контрольні задачі для комплексного вивчення дисципліни електричні машини.

Методичні вказівки призначені для студентів 1 с.т., 2 с.т., 3, 4 курсів денної і заочної форм навчання, за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензенти: Герасименко В.О., к.ф-м.н., доцент, завідувач кафедри вищої математики СНАУ;
Кравченко В.О., к. ф-м. н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем

Відповідальний за випуск: Чепіжний А.В., к.т.н., доцент; завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету. Протокол № 6 від « 22 » травня 2023 року

Сумський національний аграрний університет, 2023

Тематичний план

№ п/п	Назва розділу, теми	Кількість годин
		Денна /дистанційна форма навчання
1	Практичні заняття	16/14

ЗМІСТ

Вступ.....	8
I. ТРАНСФОРМАТОРИ.....	10
1.1 Загальні відомості про трансформатори.....	10
1.1.1. Призначення і області застосування трансформаторів.....	10
1.2 Робочий процес трансформатора.....	13
1.2.1 Принцип дії трансформатора.....	13
1.2.2. Векторна діаграма при активно-ємнісному навантаженні.....	19
1.2.3 Схема заміщення трансформатора.....	20
2. . АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ (4 ГОДИНИ).....	30
3. СИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ (4 ГОДИНИ).....	40
4. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (4 ГОДИНИ)	50
ДОДАТОК А, Б.....	67
ДОДАТОК В.....	68
Список рекомендованої літератури.....	69

ВСТУП

Ці методичні вказівки містять основні формули, відомості та контрольні завдання, які використовуються при проведенні практичних занять з дисципліни "Електричні машини", що вивчається на кафедрі енергетики та електротехнічних систем Сумського національного аграрного університету. Ці методичні вказівки також можуть використовуватися студентами інших електромеханічних та електроенергетичних спеціальностей, які вивчають курс "Електричні машини".

Ці методичні вказівки складені на основі силабусу «Електричні машини» спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Мета: формування у студентів знань і практичних навиків в області використання електричних машин різних типів.

Практичні заняття складаються з чотирьох частин: «Трансформатори», «Асинхронні машини», «Синхронні машини», «Машини постійного струму».

1.1 Метою викладання навчальної дисципліни «Електричні машини» є формування теоретичних знань та практичних навичок у галузі електричних машин та трансформаторів, їх електричних та механічних властивостей, енергетичних і теплових процесів, що мають місце при їх роботі.

1.2 Основними завданнями вивчення дисципліни «Електричні машини» є: вивчення принципів побудови електричних машин та трансформаторів, методів їх розрахунку та областей застосування.

1.3 Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

- знати: будову і принцип дії окремих видів електричних машин і трансформаторів; основні елементи конструкцій і матеріали, з яких вони виконуються,

- знати: електромагнітні та електромеханічні процеси в електричних машинах і трансформаторах та їх вплив на режим роботи, характеристики і енергетичні показники; способи пуску та регулювання швидкості обертання електричних машин; особливості експлуатації електричних машин і трансформаторів; математичні моделі електричних машин і трансформаторів різного рівня,

- вміти: вибирати електричні машини і трансформатори для конкретних умов їх практичного використання; використовувати основні рівняння та паспортні дані електричних машин і трансформаторів для визначення їхніх параметрів для аналізу режимів роботи характеристик та енергетичних показників; вміти адекватно застосувати математичні моделі електричних машин і трансформаторів,

- мати компетентності: для конкретних машин і механізмів вирішувати питання управління електричними машинами залежно від особливостей технологічного процесу; підбирати струмовий захист відповідно до режимів

роботи електричних машин; розробляти систему сигналізації аварійних режимів і відхилень від заданих режимів у процесі експлуатації.

При вирішенні практичних завдань передбачено використання як абсолютних, так і відносних величин, що дозволяє закріпити навички по їх взаємному перетворенню. Для полегшення вирішення завдань, що вимагають використання допоміжних табличних даних або нестандартних формул, не розглянутих в загальному курсі, ці відомості наведені в додатку.

З метою контролю знань і самоперевірки після кожного розділу наведені контрольні питання. При використанні методичних вказівок студентами підбір завдань проводиться викладачем згідно з вимогами силабусу курсу.

Деякі завдання забезпечені відповідями, а в разі набору варіантів, відповідь наведено для першого з них.

Корисною є література, яка допоможе в розв'язанні задач.

I. ТРАНСФОРМАТОРИ

1.1 Загальні відомості про трансформатори

1.1.1 Призначення і області застосування трансформаторів

Трансформатор – статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше число індуктивно пов'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму.

В загальному випадку вторинна система змінного струму може відрізнятися від первинної деякими параметрами: значеннями напруг і струму, числом фаз, формою кривої напруги чи струму, частотою.

Застосування трансформаторів можна поділити на такі напрямки:

1) *для передачі і розподілу електричної енергії*. Передавати електроенергію на далекі відстані вигідно при великих напругах, тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, що підвищують напругу.

Електрична енергія розподіляється між промисловими підприємствами і населеними пунктами, у містах і сільській місцевості, а також усередині промислових підприємств по повітряних і кабельних лініях при напрузі 220, 110, 35, 20, 10 і 6 кВ. Отже, у всіх вузлах розподільних мереж повинні бути встановлені трансформатори, що знижують напругу. Крім того, понижувальні трансформатори варто встановлювати в пунктах споживання електроенергії, тому що більшість електричних споживачів змінного струму працює при напругах 220, 380 і 660 В. Таким чином, електрична енергія при передаванні від електричних станцій до споживачів піддається в трансформаторах багаторазовому перетворенню (3–5 разів). Для таких цілей використовуються однофазні і трифазні трансформатори, двообмоткові і триобмоткові [1]. Зовнішній вигляд такого трансформатора показано на рис. 1.1;

2) *для забезпечення потрібної схеми включення вентилів у перетворювальних пристроях і узгодження напруг на вході перетворювача*.

У вентильних перетворювачах, що випрямляють змінний струм або перетворюють його з постійного в змінний (інвертори), відношення напруг на вході і виході залежить від схеми включення вентилів. Тому якщо на вхід перетворювача подається стандартна напруга, то на виході виходить нестандартна. Для усунення цього недоліку вентильні перетворювачі, як

правило, постачають трансформаторами (рис. 1.2), що забезпечують стандартну вихідну напругу при прийнятій схемі включення вентилів.



Рис. 1.1 – Зовнішній вигляд силового масляного трансформатора

У вентильних перетворювачах, що випрямляють змінний струм або перетворюють його з постійного в змінний (інвертори), відношення напруг на вході і виході залежить від схеми включення вентилів. Тому якщо на вхід перетворювача подається стандартна напруга, то на виході виходить нестандартна. Для усунення цього недоліку вентильні перетворювачі, як правило, постачають трансформаторами (рис. 1.2), що забезпечують стандартну вихідну напругу при прийнятій схемі включення вентилів. Крім того, ряд схем включення вентилів вимагає обов'язкового застосування трансформатора. Трансформатори, які використовуються для цієї мети, називають *перетворювальними*. Розглянуті трансформатори виконують одно-, три- і багатофазними з регулюванням вихідної напруги в широких межах і без регулювання;



Рис. 1.2 – Трансформатор силовий сухий для живлення комплектних

тиристорних перетворювачів електроприводів

3) *для різних технологічних цілей: зварювання (зварювальні (рис. 1.3) трансформатори), живлення електротермічних установок (електропідігрівні трансформатори) і ін.;*



Рис. 1.3 – Зварювальні трансформатори

4) *для живлення різних кіл радіо- і телевізійної апаратури; пристроїв зв'язку, автоматики і телемеханіки, електробудинок приладів; для розділення електричних кіл різних елементів цих пристроїв; для узгодження напруг і т. ін. Трансформатори, які використовуються в цих пристроях (рис. 1.4), зазвичай мають малу потужність, невисоку напругу. Їх виконують дво-, три- і багатообмотковими;*

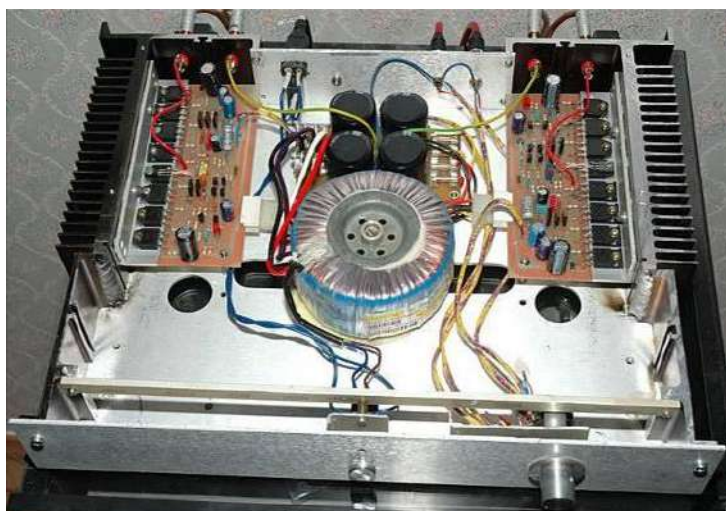
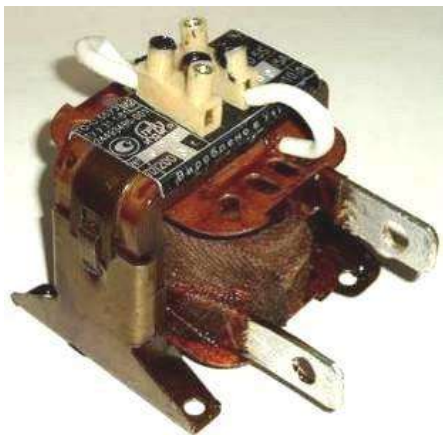


Рис. 1.4 – Трансформатор для радіоапаратури

5) *для включення електровимірювальних приладів і деяких*

апаратів, наприклад реле, в електричні кола високої напруги або в кола, по яких протікають великі струми, з метою розширення меж вимірювання і забезпечення електробезпечності. Трансформатори (рис. 1.5), які використовують для цієї мети, називають **вимірювальними**. Вони мають порівняно невелику потужність, обумовлену потужністю, яка споживається електровимірювальними приладами, реле й ін.

Трансформатори, перераховані в п. 1), 2), 3) і частково в п. 4), які призначені для перетворення електричної енергії в мережах енергосистем і споживачів електричної енергії, називають **силовими**. Для режиму їхньої роботи характерна незмінна частота змінного струму і дуже малі відхилення первинної і вторинної напруг від номінальних значень [1].



а)



б)

Рис. 1.5 – Вимірювальні трансформатори струму (а) і напруги (б)

1.2 Робочий процес трансформатора.

1.2.1 Принцип дії трансформатора

Розглянемо принцип дії однофазного двообмоткового трансформатора, що складається з замкнутого магнітопроводу 3, виконаного з феромагнітного матеріалу, на який намотані обмотки 1 та 2 (рис. 1.6).

Первинну обмотку 1 підключають до джерела змінного струму – електричної мережі з напругою u_1 . До *вторинної обмотки* 2 приєднують опір навантаження (load) Z_n .

Обмотку більш високої напруги називають *обмоткою високої напруги* (ВН), а низької напруги – *обмоткою низької напруги* (НН). Початки і кінці обмотки ВН позначають буквами *A* та *X*; обмотки НН – буквами *a* і *x*.

Принцип дії трансформатора базується на явищі електромагнітної індукції.

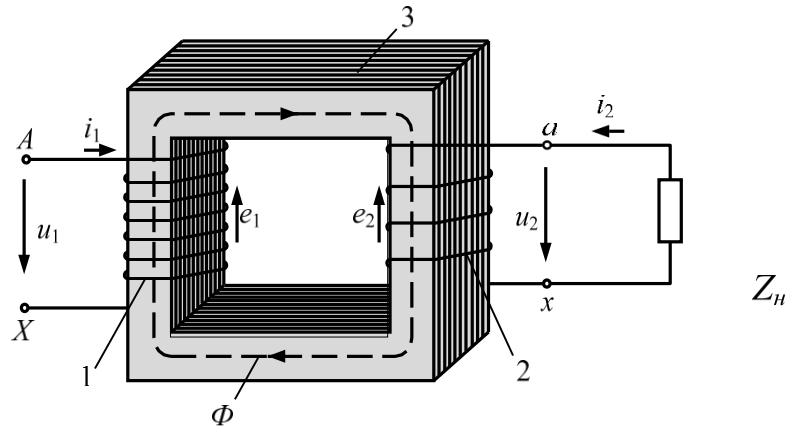


Рис. 1.6 – Електромагнітна система однофазного трансформатора: 1 – первинна обмотка; 2 – вторинна обмотка; 3 – магнітопровід

При підключенні трансформатора до мережі в первинній обмотці протікатиме змінний струм i_1 , що створює змінний магнітний потік Φ , який замикається по магнітопроводу. Крім основного магнітного потоку Φ індукуються в кожній обмотці *потоки розсіювання* $\Phi_{\sigma 1}$ та $\Phi_{\sigma 2}$ (на рис. 1.6 не показані). Ці потоки не беруть участі в передачі електричної енергії.

Потік Φ індує в обох обмотках змінні ЕРС – e_1 і e_2 , пропорційні, згідно з законом Максвелла, числам витків w_1 і w_2 відповідної обмотки і швидкості зміни потоку $d\Phi/dt$:

– у первинній обмотці *ЕРС самоіндукції*

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

– у вторинній обмотці *ЕРС взаємоіндукції*

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.2)$$

Діючі значення ЕРС трансформатора можна подати у вигляді [8]:

$$E_j = 4,44 f w_j \Phi, \quad (1.3)$$

$$j = 1, 2.$$

При підключенні навантаження Z_n до виводів вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 в колі цієї обмотки протікатиме струм i_2 , а на виводах вторинної обмотки встановиться напруга u_2 .

Відношення миттєвих і діючих ЕРС в обмотках визначається виразом

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.4)$$

Якщо знехтувати спадами напруги в обмотках трансформатора, що зазвичай не перевищують 3–5% від номінальних значень напруг U_1 і U_2 , і вважати $E_1 \approx U_1$ й $E_2 \approx U_2$, то одержимо

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.5)$$

Відношення ЕРС E_1 первинної обмотки до ЕРС E_2 вторинної обмотки (або відношення їхніх чисел витків) називають *коефіцієнтом трансформації* (transformer factor)

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.6)$$

Для отримання вихідної напруги трансформатора U_2 , меншої за вхідну U_1 , число витків w_2 беруть меншим w_1 . В такому випадку трансформатор є *знижувальним* з $k > 1$. Для отримання $U_2 > U_1$, вибирають $w_2 > w_1$. В такому випадку трансформатор є *підвищувальним* з $k > 1$.

У трансформаторі перетворюються тільки напруги і струми. Потужність при цьому залишається майже незмінною (вона трохи зменшується через внутрішні втрати енергії в трансформаторі). Тому

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.7)$$

При збільшенні вторинної напруги трансформатора в k раз порівняно з первинною, струм i_2 у вторинній обмотці відповідно зменшується в k раз.

Трансформатор може працювати лише в колах змінного струму. Якщо первинну обмотку трансформатора підключити до джерела

постійного струму, то в його магнітопроводі утвориться магнітний потік, постійний у часі за величиною і напрямком. Тому в первинній і вторинній обмотках у сталому режимі не індукується ЕРС, а отже, не передається електрична енергія з первинного кола у вторинне. Такий режим небезпечний для трансформатора, тому що через відсутність ЕРС E_1 у первинній обмотці струм досить великий [1].

$$I_1 = U_1 / R_1 \quad (1.8)$$

Номінальну повну потужність можна визначити:

– для однофазного трансформатора як

$$S_{ном} = U_{1л.ном} I_{1л.ном}, \quad (1.9)$$

– для трифазного

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{1л.ном} I_{1л.ном}. \quad (1.10)$$

Приклад 1.1

Задано однофазний трансформатор номінальною потужністю $S_{ном} = 100$ кВ·А, номінальними напругами $U_{1л.ном} = 6$ кВ і $U_{2л.ном} = 0,4$ кВ при частоті $f = 50$ Гц; діюче значення напруги, що припадає на один виток обмоток, $U_{вит} = 5$ В; коефіцієнт заповнення шихтованого стрижня сталлю $k_c = 0,93$; густина струму в провідниках $\Delta = 4$ А/мм²; максимальне значення магнітної індукції в стрижні $B_{ст} = 1,4$ Тл.

Визначити: числа витків обмоток трансформатора w_1 і w_2 ; поперечний переріз проводів первинної $s_{пер1}$ і вторинної $s_{пер2}$ обмоток; поперечний переріз стрижня магнітопроводу $s_{пер.ст}$.

Розв'язок

Числа витків в обмотках:

$$w_j = \frac{U_{jл.ном}}{U_{вит}}, \quad j = 1, 2;$$

$$w_1 = \frac{6000}{5} = 1200 \text{ (витків);}$$

$$w_2 = \frac{400}{5} = 80 \text{ (витків).}$$

Номінальні значення струмів в обмотках:

$$I_{jл.ном} = \frac{S_{ном}}{U_{jл.ном}}, \quad j = 1, 2;$$

$$I_{1л.ном} = \frac{100}{6} = 16,7 \text{ (A);}$$

$$I_{2л.ном} = \frac{100}{0,4} = 250 \text{ (A).}$$

Поперечний переріз проводів обмоток:

$$s_{пер j} = \frac{I_{jл.ном}}{\Delta}, \quad j = 1, 2;$$

$$s_{пер1} = \frac{16,7}{4} = 4,2 \text{ (мм}^2\text{);}$$

$$s_{пер2} = \frac{250}{4} = 62,5 \text{ (мм}^2\text{).}$$

Припустивши, що $U_{2л.ном} = E_2$, із виразу (1.3) знаходимо значення магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{E_2}{4,44 f w_2};$$

$$\Phi = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 80} = 0,023 \text{ (Вб)}.$$

Поперечний переріз стрижня магнітопроводу:

$$S_{\text{пер.см}} = \frac{\Phi}{k_c B_{\text{см}}},$$

$$S_{\text{пер.см}} = \frac{0,023}{0,93 \cdot 1,4} = 0,02 \text{ (м}^2\text{)}.$$

1.2.2 Векторна діаграма

Векторна діаграма – графічна інтерпретація основних рівнянь (1.48) приведенного трансформатора.

Побудову діаграми (рис. 1.7) потрібно починати з вектора основного магнітного потоку $\dot{\Phi}$.

Вектор струму I_0 випереджає за фазою вектор потоку $\dot{\Phi}$ на кут δ , а ЕРС E_1 і E_2' відстають від цього вектора на кут 90° . Далі будуємо вектор I_2' . Для визначення кута зсуву фаз між E_2' і I_2' потрібно знати характер навантаження.

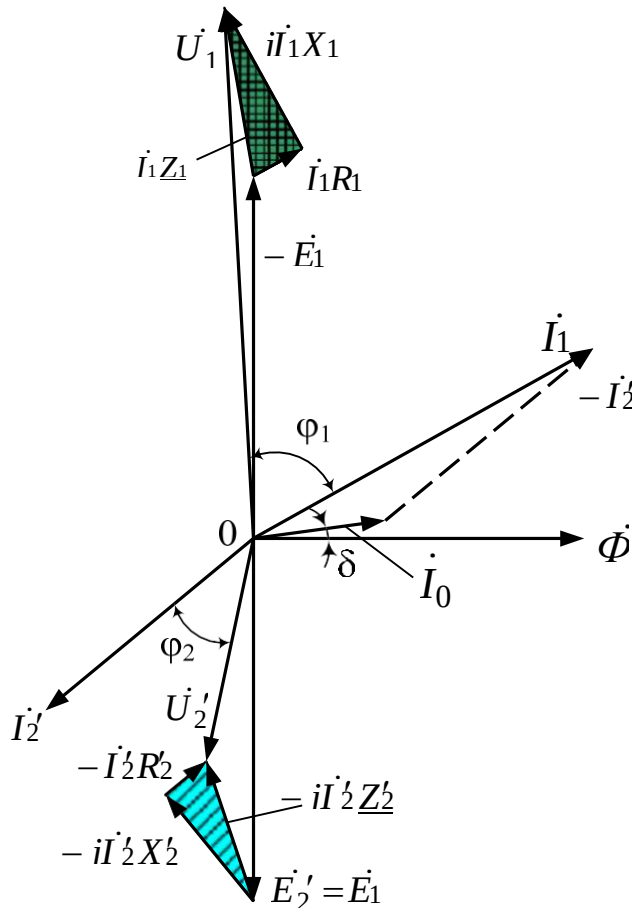


Рис. 1.7 – Векторна діаграма трансформатора при активно-індуктивному навантаженні

1.2.2.1 Векторна діаграма при активно-індуктивному навантаженні

При активно-індуктивному навантаженні вектор I_2' відстає за фазою від E_2' на кут

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_2' + X_n'}{R_2' + R_n'}, \quad (1.49)$$

де X_n' , R_n' – приведені реактивний та активний опори навантаження, відповідно.

З кінця вектора E_2' опускаємо перпендикуляр на напрямок вектора струму I_2' і відкладаємо на ньому вектор $-jI_2'X_2'$. Потім проводимо пряму, паралельну I_2' , і на ній відкладаємо вектор $-jI_2'X_2'$. Побудувавши вектор

$-jI_2' Z_2'$, одержимо трикутник внутрішніх спадів напруги у вторинному колі.

З точки 0 проводимо вектор $\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - I_2' \underline{Z}_2'$, який випереджає за фазою струм I_2' на кут φ_2 .

Вектор первинного струму будуюмо як векторну суму: $\dot{I}_1 = \dot{I}^0 - I_2'$.

Побудуємо вектор

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1, \quad (1.50)$$

для чого до вектора $-\dot{E}_1$, який випереджає за фазою вектор потоку $\dot{\Phi}$ на 90° , додаємо вектори внутрішніх спадів напруги первинної обмотки: вектор $\dot{I}_1 R_1$, паралельний струму $\dot{I}_1$, і вектор $j\dot{I}_1 X_1$, який випереджає вектор струму $\dot{I}_1$ на кут 90° . З'єднавши точку 0 з кінцем вектора $\dot{I}_1 Z_1$, одержимо вектор $\dot{U}_1$, який випереджає за фазою вектор струму $\dot{I}_1$ на кут φ_1 .

1.2.2.2 Векторна діаграма при активно-ємнісному навантаженні

У випадку активно-ємнісного навантаження векторна діаграма трансформатора має вигляд, показаний на рис. 1.7. Порядок побудови діаграми залишається таким самим, але вигляд її трохи змінюється.

Струм I_2' у цьому випадку випереджає за фазою ЕРС E_2' на кут

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_2' - X_n'}{R_2' + R_n'}. \quad (1.51)$$

1.2.3 Схема заміщення трансформатора

В трансформаторах зв'язок між первинною й вторинною обмотками магнітна. При розрахунку режимів роботи й характеристик зручно магнітний зв'язок замінити електричним [9]. У цьому випадку дослідження роботи спрощується й зводиться до розрахунків порівняно простого електричного кола.

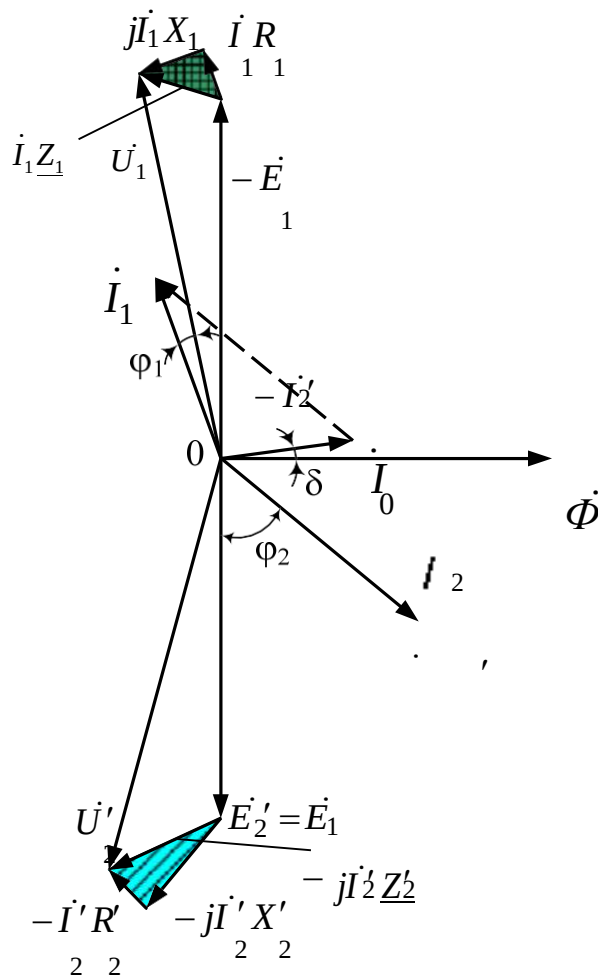


Рис. 1.8 – Векторна діаграма трансформатора при активно-ємнісному навантаженні

Електрична схема, у якій магнітний зв'язок між обмотками трансформатора замінений електричним, називається **схемою заміщення** (replacement scheme).

Структура цієї схеми вибирається таким чином, щоб їй відповідали рівняння (1.48), які описують робочий процес у трансформаторі.

Систему (1.48) можна звести до одного рівняння, якщо врахувати, що $E_1 = kE_2$, і взяти

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 \underline{Z}_m = \dot{I}_0 (R_m + jX_m), \quad (1.52)$$

де Z_m – повний опір кола намагнічування;

R_m, X_m – активний та індуктивний опори кола намагнічування, відповідно.

Опори R_m і X_m потрібно вибрати так, щоб у режимі холостого ходу, коли ЕРС E_1 практично дорівнює номінальній напрузі U_1 , струм

$$I_0 = \frac{E_1}{R_m + jX_m} = \frac{E_1}{Z_m} \quad (1.53)$$

за модулем дорівнював би діючому значенню струму холостого ходу, а потужність

$$I_0 E_1 \cos \varphi_0 = I_0 R_m^2 \quad (1.54)$$

дорівнювала б потужності, що забирається трансформатором з мережі на холостому ході.

Розв'язавши систему (1.48) відносно первинного струму, отримаємо:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m (k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2)}{\underline{Z}_m + k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2}} = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{екв}}, \quad (1.55)$$

де $\underline{Z}_{екв}$ – **еквівалентний опір схеми заміщення**:

$$\underline{Z}_{екв} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m (k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2)}{\underline{Z}_m + k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2}. \quad (1.56)$$

З еквівалентної схеми приведенного трансформатора (рис. 1.8), видно, що точки A і a , а також точки X і x мають однакові потенціали, що дозволяє електрично з'єднати вказані точки, отримавши ***T-подібну схему заміщення приведенного трансформатора*** (рис. 1.9).

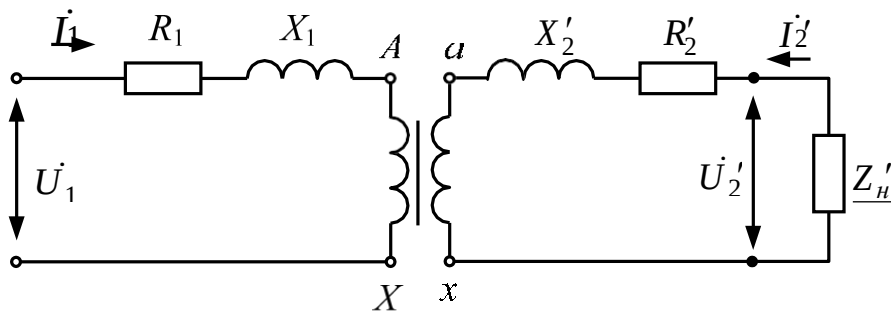


Рисунок 1.8 – Еквівалентна схема приведенного трансформатора

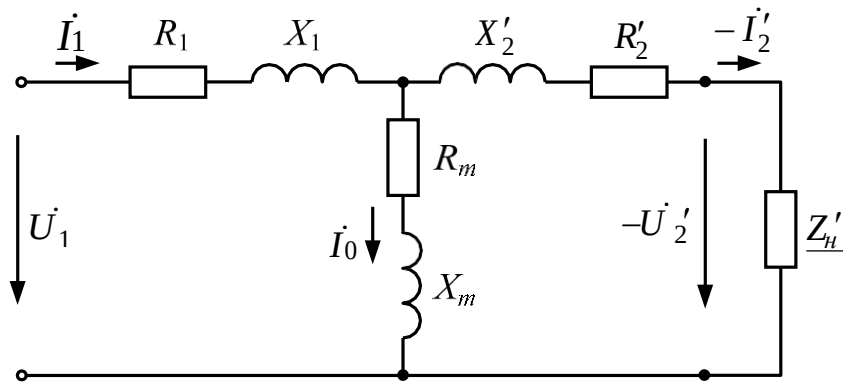


Рис. 1.9 – Схема заміщення приведенного трансформатора

Параметри схеми заміщення для будь-якого трансформатора можна визначити за даними дослідів холостого ходу і короткого замикання.

Приклад 1.2

Визначити активні й індуктивні опори трифазного трансформатора, у якого $S_{ном} = 25$ кВ·А, $U_{1ном} = 10$ кВ, $U_{2ном} = 0,4$ кВ, втрати холостого ходу $P_0 = 125$ Вт, втрати короткого замикання $P_{кз} = 690$ Вт, $U_{к.ном} \% = 4,7\%$, $I_0 = 0,032I_{1ном}$, $f = 50$ Гц, з'єднання обмоток У/У_н–0 [10].

Розв'язок

Номінальний струму первинної обмотки:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}}, \quad I_{1ном} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1,45 \text{ (А)}.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad k = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Фазна напруга короткого замикання:

$$U_{\kappa.\phi} = \frac{U_{\kappa.\text{ном}}\% U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot 100}, \quad U_{\kappa.\phi} = \frac{4,7 \cdot 10000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 271 \text{ (В)}.$$

Повний опір короткого замикання:

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa.\phi}}{I_{1\text{ном}}}, \quad Z_{\kappa} = \frac{271}{1,45} = 187 \text{ (Ом)}.$$

Активний опір короткого замикання:

$$R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{1\text{ном}}^2}, \quad R_{\kappa} = \frac{690}{3 \cdot 1,45^2} = 109 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}, \quad X_{\kappa} = \sqrt{187^2 - 109^2} = 152 \text{ (Ом)}.$$

Коефіцієнт потужності короткого замикання:

$$\cos\varphi_{\kappa} = \frac{R_{\kappa}}{Z_{\kappa}}, \quad \cos\varphi_{\kappa} = \frac{109}{187} = 0,584.$$

Активні опори первинної і приведені вторинної обмоток:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{\kappa}}{2}, \quad R_1 = R_2' = \frac{109}{2} = 54,5 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивні опори первинної і приведені вторинної обмоток:

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{\kappa}}{2}, \quad X_1 = X_2' = \frac{152}{2} = 76 \text{ (Ом)}.$$

Опори вторинної обмотки:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2}, \quad R_2 = \frac{54,5}{25^2} = 0,0873 \text{ (Ом)};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2}, \quad X_2 = \frac{76}{25^2} = 0,1215 \text{ (Ом)}.$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 = 0,032 \cdot I_{1ном}, \quad I_0 = 0,032 \cdot 1,45 = 0,0464 \text{ (А)}.$$

Опори кола намагнічування:

$$R_m = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad R_m = \frac{125}{3 \cdot 0,0464^2} = 19,3 \cdot 10^3 \text{ (Ом)};$$

$$Z_m = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}I_0}, \quad Z_m = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 0,0464} = 124,5 \cdot 10^3 \text{ (Ом)};$$

$$X_m = \frac{\sqrt{Z_m^2 - R_m^2}}{1},$$

$$X_m = \sqrt{(124,5 \cdot 10^3)^2 - (19,3 \cdot 10^3)^2} = 122 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}.$$

1.2.4 Зміна напруги трансформатора

Зміна напруги (voltage change) *трансформатора* – арифметична різниця між вторинною напругою трансформатора на холостому ході і при навантаженні, коли первинна напруга постійна і рівна номінальній і частота струму також постійна і рівна номінальній:

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = U_{2'0} - U_2'. \quad (1.89)$$

Часто її виражають у відносних одиницях:

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U_{2'0} - U_2'}{U_{2'0}} \cdot 100. \quad (1.90)$$

Зміна напруги є важливою експлуатаційною характеристикою трансформатора.

Визначення зміни напруги можна здійснювати або з використанням векторної діаграми, або аналітичним методом, використовуючи формулу.

Перший спосіб є незручним через те, що зміна напруги є незначною за величиною, а крім того, графічні побудови вносять додаткову похибку.

Оскільки на холостому ході відсутні спади напруг в обмотках трансформатора, то $U_2' = U_1$, і при номінальному значення $U_1 = U_{1ном}$. Тоді

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{1ном} - U_2'}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (1.91)$$

Інший вираз для визначення відносного спаду напруги (volt drop) [10]:

$$\Delta U_{2\%} = \frac{100I_1}{U_{1ном}} (R_k \cos\varphi_2 + X_k \sin\varphi_2). \quad (1.92)$$

При номінальному навантаженні формула (1.92) набуде вигляду:

$$\Delta U_{2ном\%} = \frac{100I_{1ном}}{U_{1ном}} (R_k \cos\varphi_{2н} + X_k \sin\varphi_{2н}) \quad (1.93)$$

або

$$\Delta U_{2ном\%} = U_{к.д.ном\%} \cos\varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin\varphi_{2н}. \quad (1.94)$$

З (1.94) випливає, що зміна напруги трансформатора пропорційна струму навантаження $I_2' = I_1$ і залежить від кута φ_2 . Тому, використовуючи поняття коефіцієнта навантаження (load factor)

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}} = \frac{I_1}{I_{1ном}}, \quad (1.95)$$

одержуємо [1, 9]:

$$\Delta U_{2\%} = \beta \Delta U_{2ном\%} = \beta (U_{к.д.ном\%} \cos\varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin\varphi_{2н}). \quad (1.96)$$

Точніша формула, використовувана для силових трансформаторів, має вигляд [1]:

$$\Delta U_{2\%} = \beta \left(U_{\text{к.а.ном}} \% \cos \varphi_{2\text{н}} + U_{\text{к.р.ном}} \% \sin \varphi_{2\text{н}} \right) + \frac{\beta^2 \left(U_{\text{к.р.ном}} \% \cos \varphi_{2\text{н}} - U_{\text{к.а.ном}} \% \sin \varphi_{2\text{н}} \right)^2}{200}. \quad (1.97)$$

Однак і формула (1.96) дає результат, точність якого повністю прийнятна в більшості випадків, що зустрічаються на практиці.

Графік залежності зміни напруги від коефіцієнта навантаження $\Delta U_2 = f(\beta)$ показаний на рис. 1.10, а). Вона має майже прямолінійний характер, тобто зміна напруги прямо пропорційна струму вторинної обмотки.

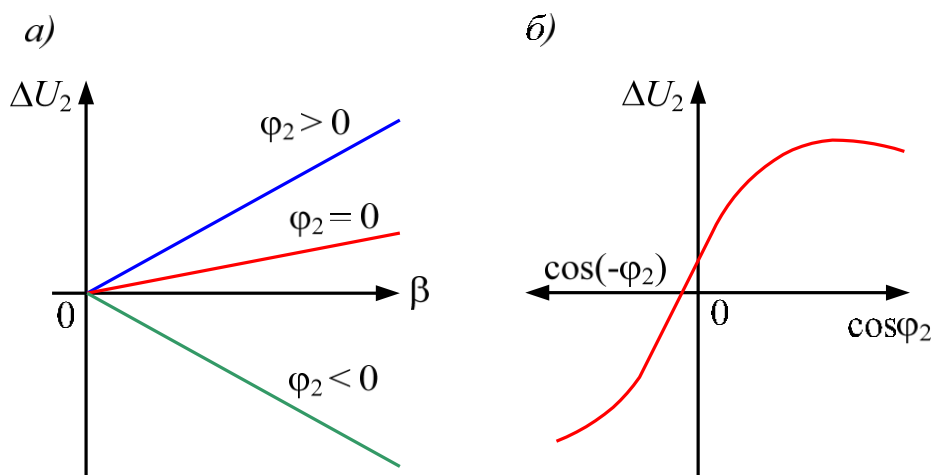


Рис. 1.10 – Графіки залежностей зміни напруги від величини навантаження (а) і від коефіцієнта потужності (б)

Графік залежності зміни напруги від коефіцієнта потужності $\Delta U_2 = f(\cos \varphi_2)$ показаний на рис. 1.10, б), з якого видно, що при активно-індуктивному навантаженні ($\varphi_2 > 0$) зміна напруги ΔU_2 має додатне значення, оскільки зі збільшенням струму навантаження I_2 вторинна напруга зменшується. При активно-ємнісному навантаженні ($\varphi_2 < 0$) зміна напруги ΔU_2 має від'ємне значення внаслідок підвищення напруги на навантаженні.

Чим більше значення напруги короткого замикання має трансформатор, тим сильніше у нього буде змінюватися вторинна напруга.

Наявність індуктивних спадів напруги, викликаних потоками розсіювання, веде до небажаної зміни напруги трансформатора під навантаженням. Щоб зменшити потоки розсіювання, первинні і вторинні обмотки виконують на тих самих стрижнях, по можливості наближаючи одну обмотку до іншої.

Мінімальна відстань між обмотками обмежується електричною міцністю ізоляційного проміжку. Внаслідок цього високовольтні трансформатори, у яких ізоляційний проміжок більший, мають відносно великі потоки розсіювання і напруги короткого замикання, порівняно з низьковольтними трансформаторами.

1.2.5 Зовнішні характеристики трансформатора

Залежність $U_2 = f(I_2)$ або $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$, $f = f_{ном} = \text{const}$ і $\cos\varphi_2 = \text{const}$ називають **зовнішньою характеристикою** (superficial characteristic) **трансформатора**.

Для її побудови можна використовувати формулу [1]:

$$U_2' = U_{1ном} \frac{1 - \Delta U_{2\%}}{100} = U_{1ном} \left[1 - \frac{\beta (U_{к.а.ном\%} \cos\varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin\varphi_{2н})}{100} - \frac{\beta^2 (U_{к.р.ном\%} \cos\varphi_{2н} - U_{к.а.ном\%} \sin\varphi_{2н})^2}{200} \right] \quad (1.98)$$

У межах зміни коефіцієнта навантаження β від 0 до 1 зовнішні характеристики практично прямолінійні (рис. 1.11).

Напруга короткого замикання U_k , її активна $U_{к.а}$ і реактивна $U_{к.р}$ складові залежать деякою мірою від номінальної потужності трансформатора. У трансформаторах середньої і великої потужності реактивна складова напруги короткого замикання значно більша, ніж активна. Тому в таких трансформаторах реактивне навантаження викликає більшу зміну напруги U_2' , ніж активна, тобто чим менший $\cos\varphi_2$, тим нижче проходить зовнішня характеристика і в більшій мірі змінюється напруга U_2' .

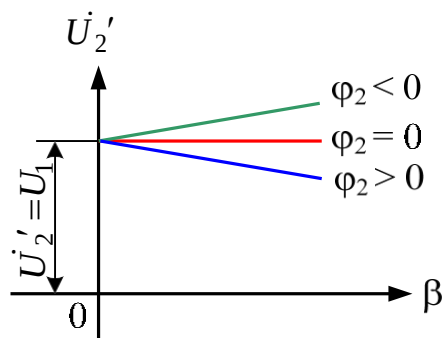


Рис. 1.11 – Зовнішні характеристики

При активно-індуктивному навантаженні завжди напруга $U_2' < U_1$. При активно-ємнісному навантаженні і при деяких кутах φ_2 вона може стати більшою за U_1 .

При заданому значенні β відносна зміна напруги ΔU_2 залежить від величини кута φ_2 .

При активному навантаженні величина ΔU_2 невелика; при активно-індуктивному навантаженні вона зростає і досягає максимального значення, коли $\varphi_2 = \varphi_k$; при активно-ємнісному навантаженні ця величина може стати від'ємною.

1.2.12 Втрати і ККД трансформатора

1.2.12.1 Енергетична діаграма

При роботі трансформатора мають місце втрати (wastes):

- електричні Δp_{el} в провідниках обмоток;
- магнітні Δp_m в сталевому осерді.

Тому сумарні втрати в трансформаторі [11-13]

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{el} + \Delta p_m. \quad (1.99)$$

Електричні втрати Δp_{el} обумовлені нагріванням обмоток трансформатора при проходженні по них електричного струму:

$$\Delta p_{el} = \Delta p_{el1} + \Delta p_{el2}, \quad (1.100)$$

де Δp_{el1} – електричні втрати в первинній обмотці;

$\Delta p_{ел2}$ – електричні втрати у вторинній обмотці,

$$\Delta p_{ел} = m(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'), \quad (1.101)$$

де m – число фаз в обмотках трансформатора.

Як видно з (1.101), електричні втрати залежать від значення струмів в обмотках трансформатора, тобто від навантаження (рис. 1.12). Тому електричні втрати є **ЗМІННИМИ**.

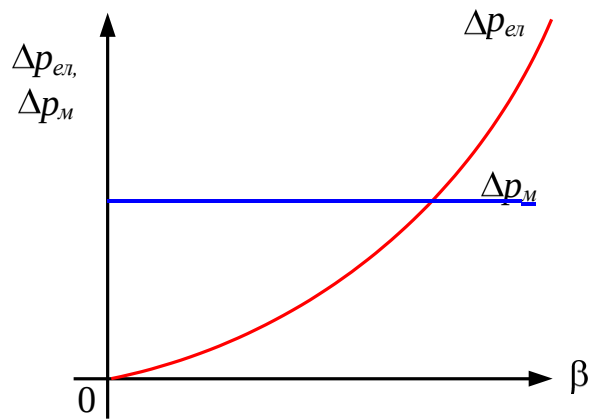


Рис. 1.12 – Залежність втрат трансформатора від навантаження

Для визначення електричних втрат використовують формулу

$$\Delta p_{ел} = \beta^2 I_2'^2 R_K = \beta^2 \Delta p_{ел.ном}, \quad (1.102)$$

де $\Delta p_{ел.ном}$ – електричні втрати при номінальному навантаженні:

$$\Delta p_{ел.ном} = I_2'^2 R_K = I_1^2 R_K. \quad (1.103)$$

Значення електричних втрат $\Delta p_{ел.ном}$ можна взяти рівним потужності короткого замикання P_K , що споживається трансформатором з мережі в режимі короткого замикання відповідно до формули (1.88), в якій потрібно врахувати номінальні струми короткого замикання у відповідних обмотках. Тому

$$\Delta p_{ел} = \beta^2 P_K. \quad (1.104)$$

Магнітні втрати Δp_m виникають через систематичне перемагнічування магнітопроводу змінним магнітним полем. Це перемагнічування викликає в магнітопроводі два види магнітних втрат:

- втрати від гістерезису Δp_z , пов'язані із затратою енергії на зменшення до нуля залишкового магнетизму в феромагнітному матеріалі магнітопроводу;
- втрати від вихрових струмів $\Delta p_{вс}$, які наводяться змінним магнітним полем в пластинах магнітопроводу.

Тому

$$\Delta p_m = \Delta p_z + \Delta p_{вс}. \quad (1.105)$$

Магнітні втрати в осерді трансформатора пропорційні квадрату напруги, що підводиться до первинної обмотки трансформатора:

$$\Delta p_m \equiv U_1^2. \quad (1.106)$$

При зміні навантаження первинна напруга трансформатора практично не змінюється. Тому магнітні втрати також не залежать від навантаження і є *постійними* (рис. 1.34).

Для зменшення магнітних втрат магнітопровід трансформатора виконують із магніто-м'якого феромагнітного матеріалу (тонколистової електротехнічної сталі). При цьому магнітопровід виконують шихтованим із тонких пластин, ізольованих одна від одної тонкою плівкою лаку.

Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті перемагнічування, тобто частоті змінного струму, а магнітні втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти:

$$\begin{aligned} \Delta p_z &\equiv f; \\ \Delta p_{вс} &= f^2. \end{aligned} \quad (1.107)$$

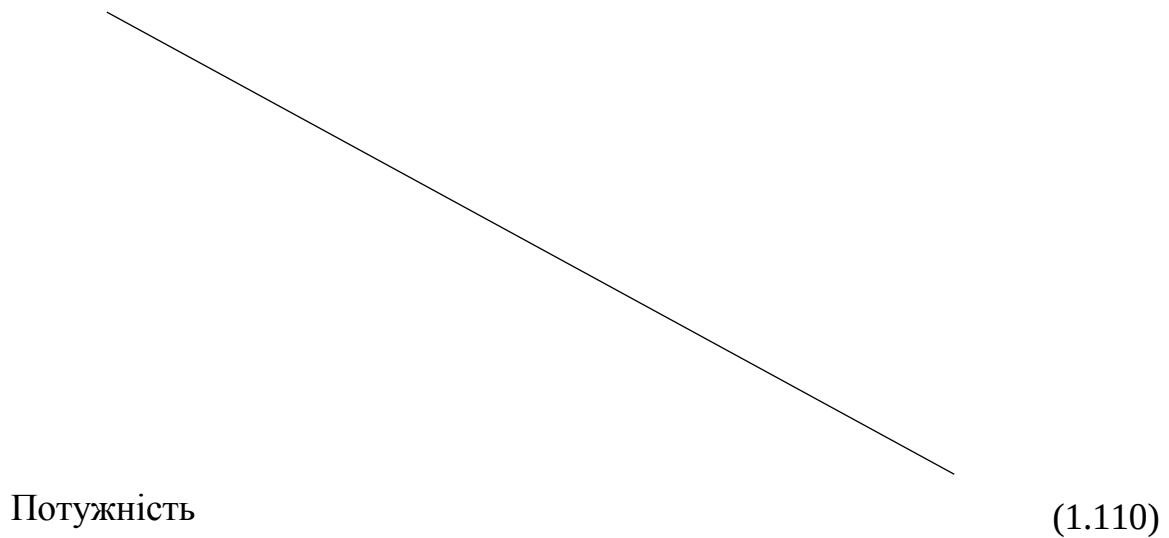
Значення магнітних втрат Δp_m можна прийняти рівним потужності P_0 , що споживається трансформатором в режимі холостого ходу і номінальній первинній напрузі:

$$\Delta p_m = P_0. \quad (1.108)$$

Сумарні втрати в трансформаторі з врахуванням (1.99), (1.104) та (1.108) визначаються як

$$\Delta p_{\Sigma} = P_0 + \beta^2 P_{\kappa}. \quad (1.109)$$

Процес перетворення енергії в трансформаторі характеризується енергетичною діаграмою (power diagram), поданою на рис. 1.13.



$$P_{em} = P_1 - \Delta p_{el1} - \Delta p_m,$$

яка надходить у вторинну обмотку трансформатора, називають **внутрішньою електромагнітною потужністю** (або просто електромагнітною потужністю).

1.2.12.1 ККД трансформатора та його залежність від навантаження

ККД трансформатора – відношення активних потужностей – корисної P_2 , що віддається навантаженню, до споживаної P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (1.111)$$

The diagram shows the efficiency formula $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}$ with the label (1.111). Below the formula, there is a power flow diagram. It shows a large red arrow for P_1 on the left, a smaller red arrow for P_{em} in the middle, and another red arrow for P_2 on the right. Blue arrows at the bottom indicate the flow of power between these stages.

або

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta p_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_\Sigma}{P_2 + \Delta p_\Sigma}. \quad (1.112)$$

Активна потужність на виході трансформатора:

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2, \quad (1.113)$$

де

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{2л.ном} I_{2л.ном}. \quad (1.114)$$

З врахуванням (1.113), (1.114) та

$$P_1 = P_2 + \Delta p_\Sigma, \quad (1.115)$$

отримаємо формулу для знаходження ККД:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa} \quad (1.116)$$

або в іншому вигляді:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_\kappa + P_0}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa}. \quad (1.117)$$

Залежність ККД від навантаження подано на рис. 1.13. При $\beta = 0$ корисна потужність і ККД дорівнюють нулю. Зі збільшенням навантаження ККД збільшується, тому що в енергетичному балансі зменшується питоме значення магнітних втрат у сталі, які постійні в трансформаторі (не залежать від навантаження). При деякому значенні $\beta_{онт}$ крива ККД досягає максимуму, після чого починає зменшуватися зі збільшенням навантаження. Причиною цього є сильне збільшення електричних втрат в обмотках, що зростають пропорційно квадратові струму, тобто пропорційно β^2 , у той час як корисна потужність P_2 зростає тільки пропорційно β .

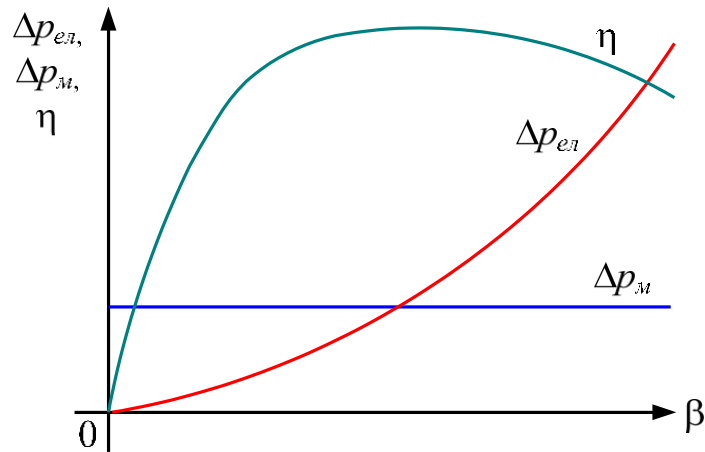


Рис. 1.13 – Залежність ККД трансформатора від навантаження

Оптимальний коефіцієнт навантаження β_{opt} , при якому ККД має максимальне значення, можна визначити, прирівнявши електричні та магнітні втрати $\Delta p_{el} = \Delta p_m$:

$$P_0 = \beta_{opt}^2 P_k, \quad (1.118)$$

звідки

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}, \quad (1.119)$$

тобто ККД має максимум при такому навантаженні, при якому електричні втрати в обмотках дорівнюють магнітним втратам у сталі.

В силових трансформаторах ККД складає 0,97–0,995 (збільшується зі зростанням потужності). Для них $\beta_{opt} = 0,4 \div 0,5$.

За рахунок збільшених втрат в трансформаторах малої потужності їхній ККД дещо менший порівняно з трансформаторами великої потужності: 0,6–0,8 при потужності до 50 Вт; 0,9–0,92 при потужності 100–500 Вт [1].

Приклад 1.3

Трифазний трансформатор має такі паспортні дані: $f = 50$ Гц;
 $U_{1ном} = 10$ кВ; $U_{2ном} = 0,4$ кВ; $P_0 = 1080$ Вт; $P_{кз} = 5900$ Вт;
 $U_{к.ном} \% = 4,7\%$; $U_{к. ном} = 0,045 U_{1ном}$; номінальний ККД $\eta_{ном} = 98,4\%$.
 Схема з'єднання обмоток – У/Д.

Визначити: фазні напруги трансформатора, лінійні і фазні коефіцієнти трансформації; номінальні струми обмоток; напругу вторинної обмотки і ККД при $\cos\varphi_{ном}$ 0,95 і 0,7.

Розв'язок

Номінальна фазна напруга первинної обмотки:

$$U_{1ф.ном} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}}, \quad U_{1ф.ном} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,78 \text{ (кВ)}.$$

Номінальна фазна напруга вторинної обмотки:

$$U_{2ф.ном} = U_{2л.ном}, \quad U_{2ф.ном} = 0,4 \text{ (кВ)}.$$

Лінійний коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad k = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Фазний коефіцієнт трансформації:

$$k_{\phi} = \frac{U_{1ф.ном}}{U_{2ф.ном}}, \quad k_{\phi} = \frac{5,78}{0,4} = 14,43.$$

Номінальні лінійні струми:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}}, \quad I_{1ном} = 400 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 23,1 \text{ А}$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{2ном}}, \quad I_{2ном} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 578 \text{ (А)}.$$

Активна і реактивна складові напруги короткого замикання:

$$U_{к.а.ном} \% = \frac{100\Delta p_{кз}}{S_{ном}}, \quad U_{к.а.ном} \% = \frac{100 \cdot 5,9}{400} = 1,475\%;$$

$$U_{к.р.ном} \% = \sqrt{U_{к.ном}^2 \% - U_{к.а.ном}^2 \%},$$

$$U_{\kappa.p.ном \%} = \sqrt{4,5^2 - 1,475^2} = 4,29\%.$$

Для $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{ном} = 0,95$ спад вторинної напруги:

$$\Delta U_{2 \%} = \beta \left(U_{\kappa.д.ном \%} \cos \varphi_{ном} + U_{\kappa.p.ном \%} \sin \varphi_{ном} \right),$$

$$\Delta U_{2 \%} = 0,8 \cdot (1,475 \cdot \cos 0,95 + 4,29 \cdot \sin 0,95) = 2,45\%$$

або в вольтах

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U_{2 \%} U_{2ном}}{100}, \quad \Delta U_2 = \frac{2,45 \cdot 400}{100} = 9,8 \text{ (В)}.$$

Вторинна напруга при $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{ном} = 0,95$:

$$U_2 = U_{2ном} - \Delta U_2, \quad U_2 = 400 - 9,8 = 390,2 \text{ (В)}.$$

ККД трансформатора при $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{ном} = 0,95$:

$$\eta_{0,95} = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_{ном}}{\beta S_{ном} \cos \varphi_{ном} + P_0 + \beta^2 P_{\kappa}},$$

$$\eta_{0,7} = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,7}{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,7 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,978.$$

1.3 Тема практичного заняття «Розв’язання задач» (2 години)

Задача 1.1

Визначити коефіцієнт трансформації n трансформатора, число витків w_1 первинної обмотки при числі витків вторинної обмотки w_2 , а також номінальні струми $I_{1\text{ном}}$ і $I_{2\text{ном}}$ в обмотках однофазного трансформатора з номінальною потужністю $S_{1\text{ном}}$, підключеного до живильної мережі з напругою $U_{1\text{ном}} = 127$ В, напруга на затискачах вторинної обмотки при холостому ході U_{20} . Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_2 , витків	40	50	60	70	80	80	70	60	60	40	50
$S_{1\text{ном}}$, кВА	3	3,6	4	6	10	5	6,6	6	4,4	3,8	4,2
$U_{1\text{ном}}$, В	127	127	220	220	220	127	220	220	127	127	127
U_{20} , В	60	100	40	60	80	40	40	60	50	40	40

Розв’язання задачі для варіанта П

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{127}{60} = 2,11$$

Оскільки $U_{20} = E_2$, при холостому ході трансформатора падіння напруги на первинній обмотці незначне, тому приблизно $U_1 \cong E_1$. Число витків первинної обмотки:

$$w_1 = n \cdot w_2 = 2,11 \cdot 40 = 84,4.$$

Номінальний струм первинної обмотки (вважаючи повні потужності обмоток $S_1 \cong S_2$):

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{3 \cdot 1000}{127} = 23,6 \text{ А}$$

Номінальний струм вторинної обмотки трансформатора (з врахуванням $U_{2\text{ном}} = U_{20}$)

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{U_{20}} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ А}.$$

Задача 1.2

Визначити коефіцієнт трансформації n трифазного трансформатора і номінальні діючі значення первинної й вторинної напруги фазні $U_{1ф.ном}$, $U_{2ф.ном}$ і лінійні $U_{2л.ном}$, при з'єднанні обмоток за схемами «зірка – зірка» і «зірка – трикутник». Первинна обмотка має число витків на фазу w_1 , вторинна - w_2 . Номінальна лінійна напруга первинної обмотки $U_{1л.ном}$. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_1 , витків	2002	1980	1200	1600	1400	2300	2000	1900	1800	1700	1980
w_2 , витків	134	126	100	106	94	140	130	127	120	112	126
$U_{1л.ном}$, В	6000	6000	3300	3300	3300	10000	10000	6000	6000	6000	6000

Розв'язання задачі для варіанта П

Коефіцієнт трансформації фазних напруг

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{2002}{134} = 15$$

Номінальна первинна фазна напруга трансформатора

$$U_{1ф.ном} = \frac{U_{1л.ном}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{1,73} = 3470 \text{ В.}$$

Номінальні вторинні напруги при з'єднанні обмоток трансформатора за схемою «зірка - зірка»:

$$\text{лінійна } U_{2л.ном} = U_{1л.ном} / n = 6000 / 15 = 400 \text{ В};$$

$$\text{фазна } U_{2ф.ном} = U_{2л.ном} / \sqrt{3} = 400 / 1,73 = 230 \text{ В.}$$

Коефіцієнти трансформації трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «зірка-зірка»:

$$\text{лінійний } n_{Y,л} = U_{1л.ном} / U_{2л.ном} = 6000 / 400 = 15;$$

$$\text{фазний } n_{Y,ф} = U_{1ф.ном} / U_{2ф.ном} = 3479 / 230 = 15 .$$

Коефіцієнти трансформації трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «зірка-трикутник»:

$$\text{лінійний } n_{\Delta,л} = U_{1л.ном} / U_{2л.ном} = 6000 / 230 = 26 ;$$

$$\text{фазний } n_{\Delta,ф} = U_{1ф.ном} / U_{2ф.ном} = 3479 / 230 = 15 .$$

Задача 1.3

Трифазний трансформатор має потужність $S_{\text{ном}}$, номінальні напруги первинної і вторинної обмоток $U_{1.\text{ном}}$, $U_{2.\text{ном}}$ при частоті мережі $f = 50$ Гц. Втрати холостого ходу при номінальній напрузі $P_{\text{хх}} = 180$ Вт, втрати короткого замикання $P_{\text{кз}} = 1000$ Вт. Визначити ККД трансформатора при заданих $\cos\varphi_2$ і коефіцієнті навантаження β , що змінюється в діапазоні від 0,4 до 1.

Побудувати залежність ККД від коефіцієнта навантаження. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{\text{ном}}$, кВа	40	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1.\text{ном}}$, кВ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2.\text{ном}}$, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$P_{\text{хх}}$, кВт	0,18	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$P_{\text{кз}}$, кВт	1,0	1,4	0,8	1,97	1,97	2,65	2,65	3,7	3,7	5,5	5,5
$\cos\varphi_2$	0,9	0,8	0,84	0,74	0,86	0,76	0,88	0,73	0,87	0,68	0,84

Розв'язання задачі для варіанта П

Для визначення ККД трансформатора скористаємося співвідношенням при коефіцієнті навантаження $\beta = 1,0$

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2 + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мх}} \cdot \beta^2} = \frac{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2 + P_{\text{хх}} + P_{\text{кз}} \cdot \beta^2} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9}{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9 + 0,18 + 1 \cdot 1^2} = 0,968.$$

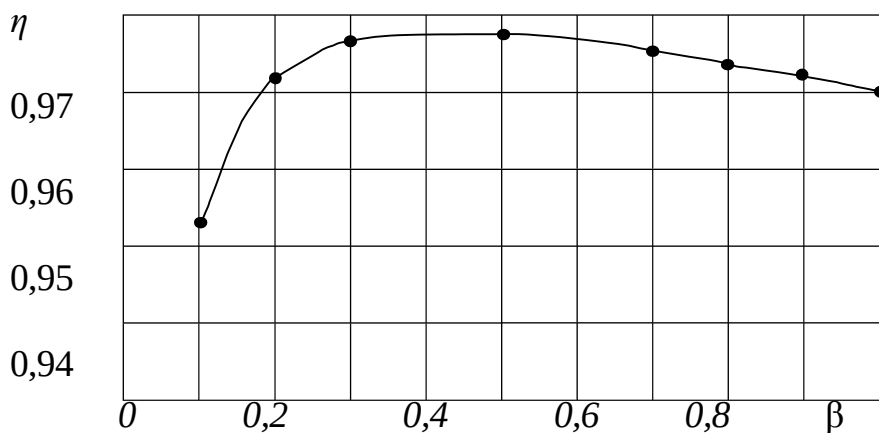


Рис. 1.14 – Розрахункова залежність ККД від β

Результати розрахунку для інших значень коефіцієнта навантаження приведені в таблиці 3. На рисунку 1.14 побудована залежність ККД від коефіцієнта навантаження трансформатора.

Таблиця 1.2

β	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
η	0,949	0,970	0,975	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968

Контрольні питання з теми «Трансформатори»

1. Поясніть призначення і принцип дії трансформатора.
 2. Чому магнітопровід трансформатора виконують з електротехнічної а не із звичайної сталі, і збирають з окремих тонких, ізольованих один від одного листів?
 3. Як розташовують обмотки трансформатора на осерді магнітопроводу?
 4. Що називають коефіцієнтом трансформації трансформатора, як його визначити?
 5. З якою метою наводиться електрична схема заміщення трансформатора?
 6. З якою метою проводять досліді холостого ходу й короткого замикання трансформатора?
 7. Які дані трансформатора називають паспортними?
 8. Порівняйте векторні діаграми Т- і Г-подібної схем заміщення трансформатора; складіть за ними рівняння електричного стану.
 9. Як з'єднують обмотки трифазних трансформаторів?
- Які переваги й недоліки автотрансформаторів порівняно з трансформаторами?

2 АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ (4 ГОДИНИ)

Типові випробування виготовлених АД передбачають експериментальну перевірку коефіцієнта корисної дії (далі – ККД), $\cos\phi$, ковзання S при номінальному навантаженні, максимального і пускового моментів I пускового струму. Проведення дослідів при навантаженні можливе не завжди, особливо для великих машин. Замість цього виконують прості досліді х.х. і к.з., за даними яких будують кругову діаграму, а за нею знаходять всі необхідні параметри й будують робочі характеристики. Оцінку властивостей АД за круговою діаграмою проводять на стадії проектування після розрахунку параметрів х.х. і к.з.

2.1 Тема практичного заняття «Дослідження трифазного асинхронного двигуна під навантаженням. Розрахунок робочих характеристик»

АД з нерухомим ротором поводить себе як трансформатор. На розгоні, коли швидкість невелика, ротор можна вважати нерухомим. Оскільки ротор коротко замкнений, маємо режим к.з. При прямому пускові, коли на двигун одразу подається номінальна напруга, виникає режим, близький до аварійного к.з., і струм в 5–7 разів перевищує номінальний. Звичайно, АД швидко бере розгін і струм знижується, не встигаючи завдати шкоди. Але якщо розгін або мережа слабка (при великому струмі різко знижується напруга мережі), пусковий струм треба зменшити, що в АД з короткозамкненим

ротором досягається тільки шляхом зменшення напруги. Існують, окрім прямого, реакторний і автотрансформаторний способи пусків, що вимагає відповідних приладів. Якщо ж номінальна напруга виникає при з'єднанні обмотки статора Δ , то при запуску її можна з'єднати Y , змінивши пусковий струм у 3 рази (в зменшиться U , в $\sqrt{3}$ разів фазний струм менший за $\sqrt{3}$ лінійний). Цей спосіб називається пуск перемиканням обмоток статора з Y на Δ .

Напрямок обертання магнітного поля визначається порядком чергування фаз. Тому, щоб здійснити реверс (змінити напрям обертання), слід поміняти місцями два будь-яких проводи з трьох, що живлять АД.

При зменшенні U в $\sqrt{3}$ рази пропорційно зменшиться магнітний потік, оскільки $M = C_m \Phi_0 I_{2a}$ при $M = \text{const}$ в три рази збільшиться I_{2a} , (активний струм ротора), у зв'язку з трансформацією струму ротора в статор збільшиться і струм статора. При номінальному навантаженні зменшення U спричинить перенавантаження, що неприпустимо. Але тут є і позитивні сторони. У зв'язку

з насиченням зменшення в $\sqrt{3}$ потоку Φ_0 спричинить ще більше (в 2,5-3,5 рази) зменшення I_0 (намагнічуючий індуктивний струм), що і призведе до збільшення $\cos\phi$. Зниження Φ_0 приводить до зменшення ККД. Позитивні фактори не залежать від навантаження, негативні – пропорційні йому. Тому якщо навантаження приблизно не більше за половину номінального, вигідно вмикати обмотку статора Y .

Таблиця 2.3 – Вихідні дані асинхронного двигуна під навантаженням

C	Bм													
Δ	501													
	501													
	50													
	5													
	501													
	501													
	50													
	5													

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку. Робочі характеристики АД

	$I_{1\phi}$	P_1, B	$\cos$	P_2, B	η	M_2	S

Тут $I_{1\Phi}$, P_1 , $\cos\varphi$ – по К-540; $S = \frac{n_c - n}{n_c}$;

$$U_{\Delta} = \frac{U_A + U_B + U_C}{\sqrt{3}}; I_{\Delta} = \frac{I_A + I_B + I_C}{300} \alpha_i; P = (P_A + P_B + P_C) \alpha_i;$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Delta}}; U_{\Phi\Delta} = U_{\Delta}; U_{\Phi Y} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}}; I_{\Phi\Delta} = \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}}; I_{\Phi Y} = I_{\Delta};$$

$$Z = \frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi}}; R = \frac{P}{3 I_{\Phi}^2}; X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$P_2 = 1,01(U_a + 2)I_a + P_{xx} + R_a I_a^2; \eta = \frac{P_2}{P_1}; M_2 = 0,975 \frac{P_2}{n};$$

де $R_a = 4$ Ом, $P_{xx} = 100$ Вт.

7. Зобразити разом для Δ і Y ; на одному графіку $I_{1\Phi}$, $\eta = f(P_2)$, на другому – P_1 , $\cos\varphi = f(P_2)$, на третьому – M_2 , $S = f(P_2)$.

2.2 Тема практичного заняття «Визначення втрат і ККД трифазного асинхронного двигуна з дослідів холостого ходу»

АД споживає з мережі електричну активну потужність P_1 , віддає через вал корисну механічну потужність P_2 . У процесі перетворення з P_1 в P_2 частина потужності перетворюється в тепло і розсіюється в навколишнє середовище. Ця частина не може бути використана за призначенням машини, тому називається втратами потужності або просто втратами – $\sum P$:

$$\sum P = P_1 - P_2.$$

Повні втрати складаються з механічних втрат, що залежать від швидкості обертання (тертя в підшипниках, опір навколишнього середовища, вентиляція та ін.), магнітних втрат, які залежать від індукції і частоти перемагнічування (гістерезис, вихрові струми), електричних втрат, що залежать від квадрата струму (джоулеве тепло) і додаткових втрат (в АД приймають рівними 0,5% електричної потужності).

$$\sum P = P_{\text{мех}} + P_{\text{м2}} + P_{\text{Е}} + P_{\text{дод}}.$$

Оскільки $P_{\text{мех}}$ і $P_{\text{м2}}$ не залежать від навантаження (навантаженням вважаються величини струмів або потужності), вони легко визначаються в простому досліді холостого ходу. Оскільки швидкість АД змінюється незначно, механічні втрати вважаються $P_{\text{мех}} = \cos \phi$. Оскільки $B = \frac{\Phi}{S} \equiv U$, втрати в сталі $P_{\text{м2}} \equiv U^2$. При $U = 0$ і $P_{\text{м2}} = 0$, а значить, залишаються тільки $P_{\text{мех}}$. Але якщо $U = 0$, АД не буде обертатися і для розділення $P_{\text{мех}}$ і $P_{\text{м2}}$ дослід х.х. проводять на різних напругах, віднімають від $P_{\text{х}}$ електричні втрати в обмотці статора $P_{\text{Е0}} = 3r_1 I_{\text{оф}}^2$ (в обмотці ротора при х.х. струм малий і втратами нехтують) і одержують $P_{\text{м2}} + P_{\text{мех}}$. Залежність $P_{\text{м2}} + P_{\text{мех}} = f(U)$ є параболою. Зате $P_{\text{м2}} + P_{\text{мех}} = f(U^2)$ стає прямою (квадратичність врахована на осі абсцис). Тому будують цю пряму, проводячи її до осі ординат, де $U = 0$ і $P_{\text{м2}} = 0$, і ця ордината дорівнює $P_{\text{мех}} = \text{const}$ (проводять горизонтальну лінію $P_{\text{мех}} = \text{const}$). Відстань між $P_{\text{м2}} + P_{\text{мех}} = f(U^2)$ та $P_{\text{мех}} = \text{const}$ дорівнює втратам у сталі $P_{\text{СТ}} (P_{\text{м2}})$.

Для визначення $P_{\text{м2}}$ і $P_{\text{Е}}$ можна користуватися наближеною Г-подібною схемою заміщення, що складається із двох паралельних віток: намагнічуючою із струмом I_0 та навантажувальною зі струмом I_0' та опорами X_K і $r_i + r_2' / S$. У робочих режимах S мале і $r_2' / S \gg X_K$, тому струм обмотки ротора можна вважати чисто активним:

$$I_2' = \frac{U_{\phi n}}{r_i + r_2' / S}.$$

У такому разі струм обмотки статора $I_{1\phi}$ дорівнює $I_1 = I_0 + I_2'$, тоді виходить:

$$I_{1\phi} = \sqrt{(I_{1\phi} \cos \varphi_0 + I_{1\phi}')^2 + (I_{1\phi} \sin \varphi_0)^2}.$$

Електричні втрати в обмотках статора і ротора:

$$P_{\text{Е1}} = 3r_1 I_{1\phi}^2; P_{\text{Е2}} = 3r_2 I_{2\phi}^2$$

Середні параметри розраховують за наступними формулами:

$$U_{\text{Л}} = \frac{U_A + U_B + U_C}{\sqrt{3}}; I_{\text{Л}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{300} \alpha_i; P = (P_A + P_B + P_C) \alpha_i;$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}}; U_{\Phi\Delta} = U_{\text{Л}}; U_{\Phi Y} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}; I_{\Phi\Delta} = \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}; I_{\Phi Y} = I_{\text{Л}};$$

$$Z = \frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi}}; R = \frac{P}{3 I_{\Phi}^2}; X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

2.3 Тема практичного заняття «Розв’язання задач»

Задача 2.1

Багатополосний двигун при номінальному навантаженні працює з ковзанням $s = 4\%$. Частота мережі $f_1 = 50$ Гц. Визначити швидкість обертання двигуна. Вихідні дані наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число полюсів	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4
$s, \%$	4	3,6	3,2	2,8	4,4	4,8	3,3	3,5	3,8	4,2	4,5
$f_1 = 50$ Гц.	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50

Розв’язання задачі для варіанта П

Число пар полюсів $p = 6/2 = 3$; синхронна швидкість

$$n_1 = f_1 \cdot 60/p = 50 \cdot 60/3 = 1000 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = 1000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ об/хв.}$$

Задача 2.2

Швидкість обертання асинхронного двигуна при номінальному навантаженні становить n_2 об/хв, при холостому ході – n_{xx} об/хв. Визначити ковзання при навантаженні й холостому ході; $f_1 = 50$ Гц. Шкала частот обертання: 3000, 2200, 1600, 1500, 1000, 850, 800, 750, 650, 600 об/хв. Вихідні дані наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_{xx}, \text{об/хв}$	2940	2160	1550	820	630	580	580	740	730	780	840
$n_2, \text{об/хв}$	2850	2040	1320	740	560	510	490	680	660	690	760
$f_1 = 50$ Гц.	50	50	50	50	60	60	50	60	50	60	50

Розв’язання задачі для варіанта П

Синхронна швидкість для даного двигуна $n_1 = 3000$ об/хв (найближча більша). Ковзання при навантаженні

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 = \frac{3000 - 2850}{3000} 100 = 5\% ;$$

при холостому ході

$$s = \frac{3000 - 2940}{3000} 100 = 2\% .$$

Задача 2.3

Двигун з контактними кільцями включений до мережі з напругою U_H , В. На розімкнутих кільцях ротора обмірювана напруга U_2 , В. Число витків фазних обмоток статора – $w_1 = 60$, обмотувальний коефіцієнт – $k_1 = 0,94$, обмоток ротора – $w_2 = 36$, $k_2 = 0,96$. Обмотки з'єднані «зіркою». Частота мережі f_1 Гц. Визначити потік, що проходить через полюси двигуна, і ЕРС статора E_1 . Вихідні дані наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_H , В	380	380	220	220	400	400	400	390	390	380	380
U_2 , В	228	224	129	127	300	292	268	240	236	210	216
w_1 , витків	60	60	54	54	66	68	70	64	62	62	60
k_1	0,94	0,92	0,94	0,92	0,95	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
w_2 , витків	36	35	32	30	40	38	42	40	38	38	36
k_2	0,96	0,94	0,96	0,92	0,93	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,94
f_1 , Гц	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50

Розв'язання задачі для варіанта П

Фазна ЕРС нерухомого ротора

$$E_{2H} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{228}{1,73} = 132 \text{ В.}$$

Потік

$$\Phi = \frac{E_{2H}}{4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2} = \frac{132}{4,44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0,96} = 0,0173 \text{ Вб.}$$

ЕРС статора

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 0,94 \cdot 0,0173 = 216 \text{ В.}$$

Задача 2.4

Визначити величину й фазу номінального струму ротора двигуна з контактними кільцями, при заданих E_{2H} , R_2 , X_{2H} і s_H .

Вихідні дані наведені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_{2H} , В	132	130	126	122	136	140	138	135	133	137	131
R_2 , Ом	0,24	0,22	0,2	0,2	0,25	0,27	0,26	0,25	0,23	0,27	0,22
X_{2H} , Ом	1,2	1,1	1,0	1,2	1,3	1,4	1,35	1,3	1,1	1,4	1,1
s_H	0,035	0,03	0,04	0,02	0,04	0,06	0,05	0,02	0,03	0,04	0,035

Розв'язання задачі для варіанта П

$$I_{2H} = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}} = \frac{132 \cdot 0,035}{\sqrt{0,24^2 + 1,2^2 \cdot 0,035^2}} = 19 \text{ A};$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_{2H} \cdot s_H}{R_2} = \frac{1,2 \cdot 0,035}{0,24} = 0,175; \quad \psi_2 = 9055'.$$

Якщо при визначенні номінального струму ротора знехтувати індуктивним опором $X_2 = X_{2H} \cdot s$, матимемо

$$I_{2H} = \frac{E_{2H} \cdot s}{R_2} = \frac{132 \cdot 0,035}{0,24} = 19,2 \text{ A}.$$

Задача 2.5

Номінальна потужність двигуна P_H кВт, напруга U_H В, ККД η_H , коефіцієнт потужності $\cos \varphi_H$, втрати в сталі ΔP_C від P_H . Втрати потужності в обмотках статора в номінальному режимі $\Delta P_{E.C}$ від P_H . Визначити споживаний струм і електромагнітну потужність двигуна в номінальному режимі. Вихідні дані наведені в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_H , кВт	10	11	7,5	7,5	5,5	5,5	4	4	3	2,2	2,2
U_H , В	380	380	380	380	380	380	380	220	220	220	220
η_H	0,88	0,9	0,78	0,84	0,86	0,88	0,86	0,85	0,84	0,84	0,82
$\cos \varphi_H$	0,87	0,84	0,87	0,86	0,85	0,84	0,8	0,84	0,82	0,8	0,76
ΔP_C	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05
$\Delta P_{E.C}$	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03

Розв'язання задачі для варіанта П

Споживана потужність

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta_H} = \sqrt{3} U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H.$$

Номинальний струм

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 20 \text{ А.}$$

Електромагнітна потужність у номінальному режимі

$$P_{EM} = P_1 - P_C - P_{EC} = P_H / \eta_H - 0,05 \cdot P_H - 0,03 \cdot P_H = \\ = 10 / 0,88 - 0,05 \cdot 10 - 0,03 \cdot 10 = 10,55 \text{ кВт.}$$

Контрольні питання з теми «Асинхронні електричні машини»

1. Як виконують магнітопровід АД?
2. Поясніть принцип виконання обмотки статора АД.
3. Як виконують обмотку ротора короткозамкненого двигуна?
4. Поясніть будову обмотки ротора двигуна з контактними кільцями.
5. Як вибирають схему з'єднань обмоток статора і як встановити однойменні виводи фазних обмоток статора?
6. Від чого залежить швидкість обертання магнітного поля? Чим визначається число пар полюсів двигуна?
7. Як створюється обертовий момент АД, чому ротор не може самостійно досягти синхронної швидкості обертання?
8. Як визначають ковзання й швидкість обертання ротора і як впливає на АД зміна навантаження на валу?
9. Що розуміють під механічною характеристикою двигуна і який вигляд механічної характеристики АД?
10. Як визначають діючі значення фазних ЕРС статора й ротора?
11. Як залежать ЕРС ротора й частота струму ротора від ковзання?
12. Як враховують ЕРС розсіювання статора й ротора?
13. Поясніть роль ЕРС статора. Як записується рівняння напруг статора?
14. Запишіть рівняння напруг ротора. Як залежить від ковзання струм ротора і його фаза?
15. На підставі яких рівнянь будується повна векторна діаграма й схема заміщення асинхронного двигуна? Як будується векторна діаграма?
16. Які види втрат потужності мають місце в АД? Що розуміють під електромагнітною й механічною потужністю двигуна?
17. Визначіть поняття «номінальна потужність двигуна».
18. Як залежать електричні втрати в роторі від ковзання?
19. Від чого залежить обертовий момент двигуна?
20. Проаналізуйте залежність обертового моменту від ковзання. Що розуміють під коефіцієнтом перевантажувальної здатності і яка його величина для звичайних АД?
21. Поясніть умову усталеної роботи двигуна.
22. Від чого і як залежить критичний момент і критичне ковзання?

23. Які є можливості впливу на механічну характеристику АД?
24. За якими показниками оцінюють пускові властивості двигуна?
25. Позитивні якості й недоліки прямого пуску асинхронних короткозамкнених двигунів.
26. Позитивні якості й недоліки запуску двигунів на зниженій напрузі.
27. Як пускають в хід двигуни з контактними кільцями? Дайте загальну оцінку їхніх пускових властивостей.
28. Що розуміють під робочими характеристиками двигуна? Поясніть характер цих залежностей для АД.
29. Умова переходу асинхронного двигуна до генераторного режиму. Поясніть практичне значення такого режиму.
30. Які можливі способи гальмування асинхронного двигуна? Дайте їхню оцінку й поясніть практичне значення.
31. Поясніть будову і принцип дії однофазного АД.
32. Як пускають в хід однофазні двигуни

3. СИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ (4 ГОДИНИ)

3.1. Практичне заняття «Розрахунок індуктивних опорів обмотки статора трифазної синхронної машини»

Синхронна машина має два електричні ланцюги: ланцюг трифазної обмотки статора, що підключається до мережі чи до навантаження, і ланцюг обмотки збудження, по якій пропускається постійний струм від стороннього джерела. Обмотка збудження служить для створення основного магнітного потоку Φ_0 , що перетинає повітряний зазор і замикається на статорі; цей потік обертається електрично із синхронною швидкістю. У цьому ж напрямку і з тією ж швидкістю механічно обертається ротор; у результаті цей потік Φ_a нерухомий щодо ротора. Вплив Φ_a на Φ_0 називається реакцією статора (чи реакцією якоря, аналогічно машинам постійного струму). Якщо поле статора спрямоване уздовж осі явно полюсного ротора (продольна вісь d) при невеликому повітряному зазорі, Φ_{ad} , L_{ad} , X_{ad} максимальні. Якщо поле спрямоване посередині між полюсами (поперечна вісь q) з великим повітряним зазором, Φ_{aq} , L_{aq} , X_{aq} мінімальні. Таким чином, X_{ad} і X_{aq} – індуктивні опори реакції якоря відповідно по подовжній і поперечній осях. Крім потоку Φ_a , навколо провідників трифазної обмотки статора існує потік, що не проникає в ротор.

Це потік розсіювання Φ_σ , якому відповідає індуктивний опір X_σ :

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma ; X_q = X_{aq} + X_\sigma ,$$

де X_d і X_q – відповідно подовжній і поперечній синхронні індуктивні опори. Активний опір обмотки статора набагато менше індуктивних і R_a часто нехтують.

Таким чином, синхронний індуктивний опір – це опір, який чинить обмотка статора симетричній трифазній напрузі, якщо ротор обертається синхронно з полем. Оскільки поле при цьому не перетинає обмотку ротора і не індукує в ній ЕРС, остання може бути розімкнута. При невеликій різниці швидкостей, що забезпечується приводним асинхронним

двигуном, поле буде повільно переміщуватися щодо ротора; індуктивний опір, а виходить, і струм у колі буде повільно коливатися. Опору X_d відповідатиме мінімальний струм і найбільше U (у результаті зменшення падіння напруги джерела). Опір X_q буде супроводжувати зворотна картина.

При несиметричних режимах трифазна система струмів розкладається на симетричні системи: прямої послідовності, якій відповідають опори X_d і X_q ; зворотної послідовності з опором X_2 і нульової послідовності X_0 . Струми зворотної послідовності утворюють потік, що обертається у бік, протилежний обертанню ротора. Для забезпечення цього в попередній схемі міняють місцями будь-які два проводи, приєднані до обмотки статора. Оскільки поле обертається щодо ротора з подвійною синхронною швидкістю, в обмотці ротора індукується ЕРС подвійної частоти. У нормальних умовах обмотка ротора замкнута на джерело з малим внутрішнім опором; тому й в умовах досліду вона замикається накоротко. Змінний струм обмотки ротора, як і вторинної обмотки трансформатора, справляє розмагнічуючу дію. Тому X_2 менше X_d і X_q .

Струми нульової послідовності не зрушені за фазою і не створюють обертового потоку, тому досвід по визначенню X_0 проводять при однофазному живленні. Потоки фаз не можуть проникнути в ротор, тому індуктивний опір нульової послідовності X_0 обумовлено потоками розсіювання. У перехідних режимах, наприклад, при раптовому к.з. усіх трьох фаз, різко збільшується струм і прагне зрости магнітний потік. Обмотка статора чинить перешкоду зростанню струму, тобто володіє перехідним індуктивним опором і позначається X' . Якщо вісь потоку Φ_a збігається з віссю ротора, буде спостерігатися поздовжній опір X'_d . При цьому струм, індукований у замкнутій обмотці збудження, перешкоджає проходженню потоку уздовж ротора; потік змушений обгинати ротор, замикаючи по повітрю. Він послабляється, через що X'_d відносно мало. Якщо Φ_d спрямований по поперечній осі, буде спостерігатися X'_q . Оскільки при цьому потік не зв'язаний з обмоткою збудження, остання не зменшує X'_q . Тому звичайно $X'_q > X'_d$ (на противагу тому, що $X_d > X_q$). При проведенні даного досвіду необхідно виключити вплив індуктивних опорів X_d і X_q . Для цього вибирають режим однофазного живлення (немає обертового поля) при нерухомому роторі.

Оскільки активними опорами зневажають, індуктивні опори знаходять методом вольтметра й амперметра. При цьому варто враховувати опори однієї фази, тому $X = U_\phi / I_\phi$. Якщо прилади в ланцюзі обмотки статора, з'єднаної трикутником, показують напругу U і струм I , то фазні величини $U_\phi = U$; $I_\phi = I/3$ при трифазному живленні, $I_\phi = I/1,5$ при однофазному живленні.

Джерелом живлення є трифазний трансформатор, від кожної фази вторинної обмотки якого виконані три виводи на три значення напруги.

3.2. Практичне заняття «Побудова характеристик синхронного генератора при його роботі на автономне навантаження.»

Характеристики – це залежності між основними даними, що визначають режим роботи електричних машин (напругою обмотки статора, її струмом, струмом обмотки збудження і т. д.). За характеристиками судять про властивості генераторів. Приблизно постійна частота обертання забезпечується тим, що приводний асинхронний двигун

навантажується не більш чим на чверть своєї номінальної потужності. Основні характеристики знімаються при постійній частоті обертання і постійному коефіцієнті потужності $\cos\varphi$.

До основних характеристик відносяться:

1) характеристика х.х. $E_0 = f(I_b)$

при $I_c = 0$, $n = \text{const}$, де

$E_0 \sim$ ЕРС обмотки статора;

I_c – струм обмотки статора (чи струм навантаження); I_b – струм обмотки збудження.

Через насичення магнітного ланцюга характеристика х.х. нелінійна.

2) навантажувальна характеристика $U = f(I_b)$

при $I_c = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$; $n = \text{const}$.

При активному навантаженні напруга на затискачах генератора зменшується порівняно з її значенням при х.х. за рахунок падіння напруги в ланцюзі якоря і за рахунок розмагнічуючої дії поперечної реакції якоря.

При чисто індуктивному навантаженні напруга падає більше, тому що подовжня реакція якоря сильніше розмагнічує машину, і навантажувальна характеристика розташовується помітно нижче характеристики х.х.

3) зовнішня характеристика $U = f(I_c)$

при $I_b = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$; $n = \text{const}$.

Залежно від характеру навантаження реакція якоря може бути: поперечна (при активному навантаженні), подовжньо-намагнічуюча (при ємнісному навантаженні), подовжньо-розмагнічуюча (при індуктивному навантаженні). Тому при різних видах навантаження будуть різні значення номінальної зміни напруги при переході від х.х. до номінального режиму:

$$U\% = ((U_0 - U_n) / U_n) 100\% .$$

4) характеристика к.з. являє собою залежність струму короткозамкненої статорної обмотки від струму збудження при постійній частоті обертання: $I_k = f(I_b)$ при $U = 0$ і $n = \text{const}$. Оскільки обмотка статора має індуктивний опір значно більше активного, то струм к.з. майже чисто індуктивний, а реакція якоря подовжньо-розмагнічуюча. Тому магнітна система в цьому режимі ненасичена і характеристика к.з. – лінійна. Рівняння рівноваги МРС при цьому

$$F_0 + F_{ad} = 0,$$

де F_0 – МРС обмотки збудження;

F_{ad} – МРС подовжньої реакції якоря, приведена до обмотки збудження.

З рівняння випливає, що МРС обмотки збудження дорівнює поздовжній МРС реакції якоря (якщо знехтувати МРС, необхідною для створення $E_k = -jI_k X_\sigma$).

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора можна визначити з досліду, знявши характеристики х.х., трифазного к.з. й індуктивну навантажувальну характеристику. Ці характеристики будують у відносних одиницях (рис. 3.1). За одиницю напруги і струму збудження вибирають номінальну напругу і відповідний йому струм збудження в режимі х.х. За одиницю струму статора – його номінальний струм.

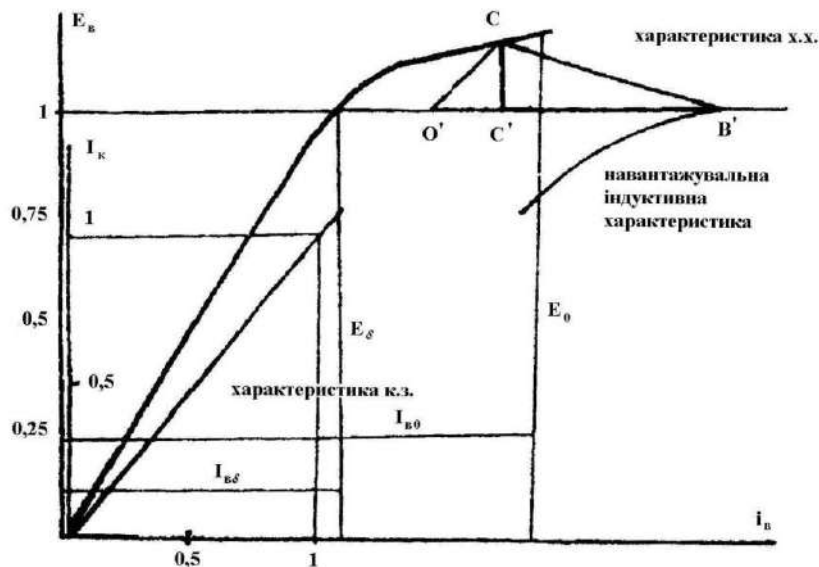


Рис. 3.1 – Характеристики х.х., трифазного к.з., індуктивна навантажувальна

За характеристикою к.з. приблизно визначаємо МРС реакції якоря в масштабі струму збудження для струму, при якому знімалася навантажувальна характеристика (відрізок $OB = I_{bad}$). Від точки B' навантажувальної кривої, що відповідає номінальній напрузі, вліво відкладаємо відрізок $O'B' = OB$. Через точку O' проводимо пряму, рівнобіжну дотичній до прямолінійної ділянки кривої х.х. Із точки перетину рівнобіжної прямої з характеристикою х.х. опускаємо перпендикуляр на пряму $O'B'$. Трикутник $CC'B'$ – реактивний, сторона його $C'B'$ представляє МДС реакції якоря в масштабі струму збудження, сторона CC' – падіння напруги в індуктивному опорі розсіювання обмотки статора у відносних одиницях.

Якщо зняти навантажувальну характеристику для номінального струму, то

$$E_\sigma = I_{нф} X_\sigma / U_{нф} = X_\sigma / Z_H,$$

тобто відрізок CC' являє собою індуктивний опір розсіювання у відносних одиницях X_σ . При знятті навантажувальної характеристики для струму $I_{сф}$, відмінного від номінального, індуктивне розсіювання визначаємо в омах як

$$X_\sigma = CC' U_{нф} / I_{сф}, \text{ а}$$

потім виражаємо у відносних одиницях:

$$X_\sigma = X_\sigma / Z_H.$$

При роботі генератора під навантаженням в обмотці статора індуються наступні ЕРС: обертальним полем, створюваним обмоткою збудження – E_0 , обертальним полем реакції якоря і полем розсіювання обмотки статора – E_σ . Тоді рівняння рівноваги фазних ЕРС обмотки статора матиме вигляд:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{I}_{cr1} + \dot{U}_c.$$

Позначивши

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{E}_\delta,$$

одержимо

$$\dot{E}_\delta - j\dot{I}_c x_\sigma = \dot{U}_c \quad (\dot{I}_{cr1} \approx 0).$$

Для заданого режиму роботи, знаючи $\cos\phi$, відкладаємо у відносних одиницях вектори напруги U і струму I_c . При чисто активному навантаженні $\phi = 0^\circ$ дорівнює нулю, для чисто індуктивного – 90° . При побудові діаграми бажано масштаби для її векторів вибирати такими ж, як на рисунку 3.2.

Відповідно до рівняння $\dot{E}_\delta = \dot{U}_c + j\dot{I}_c x_\sigma$, визначаємо результуючу ЕРС E_δ . За кривою х.х. відповідно E_δ знаходимо результуючу МРС $F_{\delta} = F_{\delta 0} + F_{\delta \sigma}$ тобто результуюча МРС складається з МРС, створюваної обмоткою збудження $I_{\delta 0}$, і МРС, створюваної обмоткою статора $I_{\delta \sigma}$ (МРС беруть у масштабі струму збудження).

3.3. Практичне заняття «Електромагнітні процеси в електричних та магнітних колах синхронних машин в режимі холостого ходу та навантаження. Розв'язання задач»

Задача 3.1

Умова завдання відбиває важливі співвідношення, що характеризують форму кривій напруги й поля збудження при холостому ході синхронної машини. Це дозволяє представити взаємозв'язок між системою коефіцієнтів, що визначають форму напруги й магнітного поля, і оцінити порядок їхніх числових значень.

Числові значення величин: $F_{fm} = 26000$ А; $D_i = 145$ см; $l_\delta = 200$ см; $\delta' = 3,5$ см; $\rho = 0,76$; $2p = 2$.

Визначити: Φ_{fm} , Φ_{fm1} , k_Φ , k_b , а також нове значення ρ .

Рішення: Покажемо схематично (рис. 3.3) синхронну машину, що має на роторі неявнополюсну розподілену двополюсну обмотку збудження з

довжиною обмотаної частини полюса b . Задана за умовами відносна довжина обмотаної частини полюса $\rho = b/\tau$. Розподіл уздовж розточення статора магніторушійної сили, утвореною цією обмоткою при протіканні в ній струму збудження, представимо східчастої кривої. При цьому на необмотаній частині полюса (великий зуб) МРС обмотки незмінна.

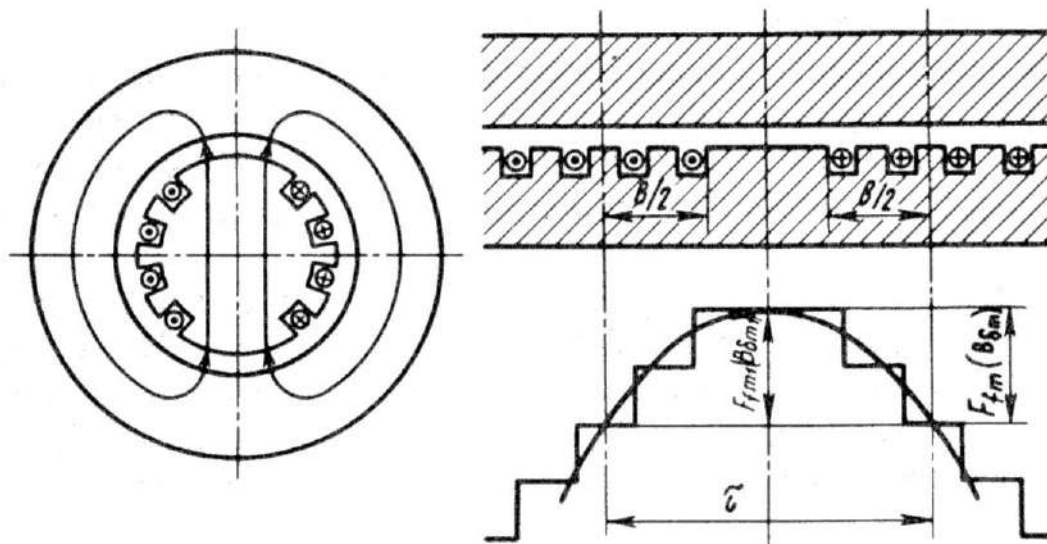


Рис. 3.3 – Схематичне зображення синхронної машини

Індукція в зазорі $B_{\delta} = \mu_0 F_f / \delta'$. Тому крива індукції повторює за формою криву МРС. Вона також ступінчаста з максимальним значенням індукції на осі полюса:

$$B_{\delta m} = \mu_0 F_{fm} / \delta' = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 26000 / (3,5 \cdot 10^{-2}) = 0,933 \text{ Тл.}$$

При розкладанні східчасто розподіленої індукції в гармонійний ряд першу гармонійну індукцію $B_{\delta 1m}$ можна визначити за допомогою коефіцієнта форми поля збудження $k_f = B_{\delta 1m} / B_{\delta m}$ Для розглянутої неявнополюсної машини

$$k_f = 8 \sin(\rho\pi/2) / (\pi^2 \rho) = 8 \sin(0,76 \cdot \pi/2) / (\pi^2 \cdot 0,76) = 0,992.$$

Відповідно $B_{\delta 1m} = B_{\delta m} k_f = 0,933 \cdot 0,992 = 0,926 \text{ Тл.}$ Повний потік взаємної індукції

$$\Phi_{fm} = \alpha_{\delta} \tau l_{\delta} B_{\delta m},$$

де розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_{\delta} = 1 - 0,5\rho = 1 - 0,5 \cdot 0,76 = 0,62$; полюсний розподіл $\tau = \pi D_i / 2 \rho = \pi \cdot 1,45 / 2 = 2,28 \text{ м.}$ Звідки:

$$\Phi_{fm} = 0,62 \cdot 2,28 \cdot 2 \cdot 0,933 = 2,64 \text{ Вб.}$$

Магнітний потік взаємної індукції, що відповідає першій гармонійній індукції,

$$\Phi_{\delta m 1} = (2/\pi) \tau l_{\delta} B_{\delta 1m} = (2/\pi) 2,28 \cdot 2 \cdot 0,926 = 2,69 \text{ Вб.}$$

Коефіцієнт потоку збудження

$$k_{\phi} = \Phi_{fm} / \Phi_{fm1} = 2,64/2,69 = 0,98.$$

Коефіцієнт форми ЕРС k_{ϵ} визначимо по формулі

$$k_{\epsilon} = \pi / (2 \sqrt{2} k_{\phi}) = \pi / (2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,98) = 1,133.$$

Дорівнюючи рівняння для повного потоку й потоку за першою гармонікою ($\Phi_{fm} = \alpha_{\delta} \tau l_{\delta} B_{\delta m}$ і $\Phi_{fm1} = (2/\pi) \tau l_{\delta} B_{\delta 1m}$), одержуємо

$$(1 - 0,5\rho) \tau l_{\delta} B_{\delta m} = (2/\pi) \tau l_{\delta} k_{\phi} B_{\delta m},$$

звідки нове значення відносної довжини обмотаної частини полюса

$$\rho = [1 - (2/\pi) \cdot k_{\phi}] \cdot 2 = 2 [1 - (2/\pi) \cdot 0,992] = 0,736.$$

Відповідь: $\Phi_{fm} = 2,64$ Вб; $\Phi_{\delta m1} = 2,69$ Вб; $k_{\phi} = 0,98$; $k_{\epsilon} = 1,33$; $\rho = 0,736$.

Задача 3.2

Задача відноситься до дослідження електромагнітних процесів явнополюсної синхронної машини при навантаженні й пов'язана з обліком впливу поля якоря на поле збудження при насиченні. Рішення завдання проводиться графоаналітично із застосуванням векторних діаграм.

Числові значення величин: $X_{ad} = 1,4$; $X_{aq} = 0,7$; $X_{a\sigma} = 0,2$; $R_{\bullet} = 0$; $U_{\bullet} = 1$; $I_{\bullet} = 1$; $\cos(\varphi) = 0,8$.

Нормальні характеристики намагнічування наведені в додатку А.

Визначити: $I_{*f}(\Phi_{\sigma} = \text{var})$, $I_{*f}(\Phi_{\sigma} = \text{const})$.

Рішення. Необхідно вибрати масштаб для побудови характеристик намагнічування. Вибір масштабу орієнтовно проводиться з умови розміщення криві намагнічування в правій верхній частині аркуша обраного формату (рис. 3.4). У нашому випадку при форматі 330x200 мм $m_E = 0,2$ в.о./см, $m_F = 0,2$ в.о./см.

Визначимо струм збудження без обліку зміни потоку розсіювання обмотки збудження. За даними додатку А в обраному масштабі будуємо основну характеристику холостого ходу $E_{*f} = f(F_{*fm})$. У масштабі $m_E = 0,2$ в.о./см відкладаємо вектор напруги $U_{*} = 1$ і під кутом $\varphi = 37^{\circ}$ будуємо

вектор струму $\vec{I}_{*} = 1$ у довільному масштабі (тут $m_I = 0,4$ в.о./см).

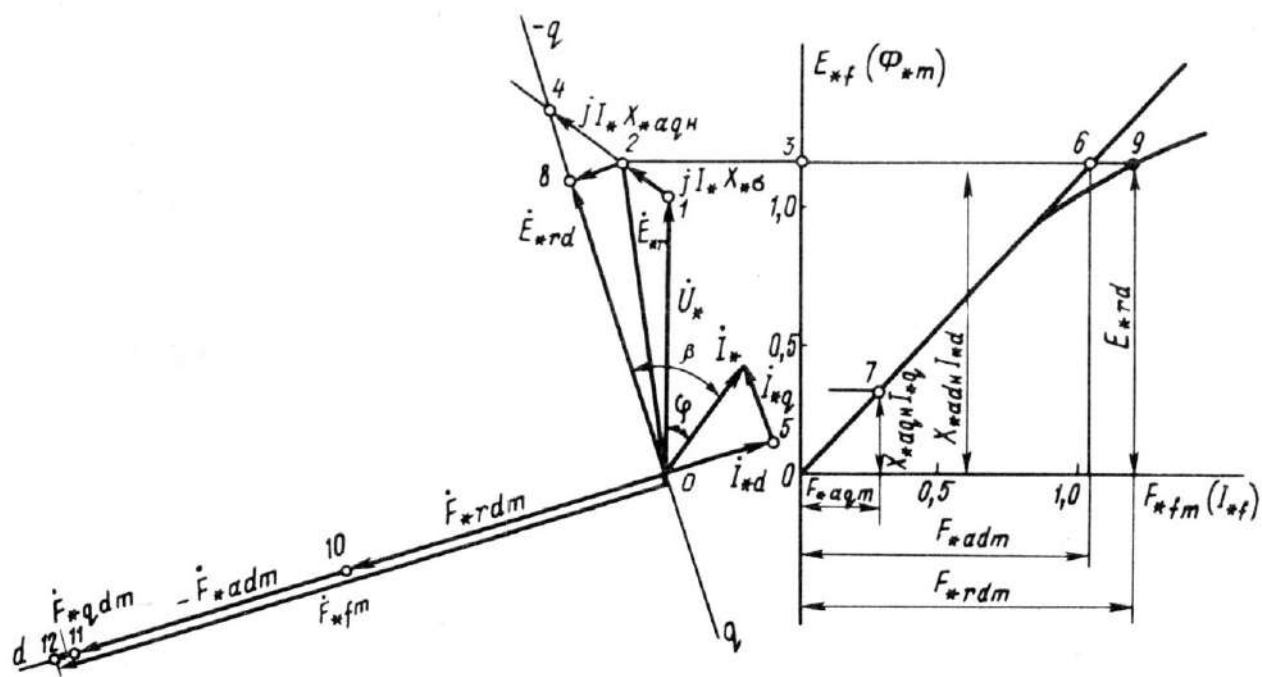


Рис. 3.4

Щоб визначити результуючу ЕРС взаємної індукції E_{*r} , від кінця вектора $\dot{U}_*$ відкладемо вектор $jX_{*o}\dot{I}_*$, довжина якого $X_{*o}I_* = 0,2 \cdot 1 = 0,2$; в обраному масштабі $0,2:0,2 = 1$ см відповідає напрузі $X_o I$ у відносних одиницях. Вимірювши довжину відрізка $OE_r = 5,7$ см, одержимо $E_{*r} = OE_r \cdot m_E = 5,7 \cdot 0,2 = 1,14$.

По величині E_{*r} за допомогою кривих додаток Б визначимо коефіцієнти $\xi_d = 0,965$, $\xi_q = 0,77$, $\xi_{qd} = 0,23$ й обчислимо значення головних індуктивних опорів з урахуванням насичення:

$$X_{*adH} = \xi_d X_{*ad} = 0,965 \cdot 1,4 = 1,35 ,$$

$$X_{*aqH} = \xi_{qd} X_{*aq} = 0,77 \cdot 0,7 = 0,54 .$$

До вектора $\dot{E}_r$ додамо вектор $jX_{*aqH}\dot{I}_*$, довжина якого в масштабі напруги $X_{*aqH}I_* / m_E = 0,54 \cdot 1 / 0,2 = 0,54 / 0,2 = 2,7$ см. Кінець комплексу $\dot{E}_{*r} + jX_{*aqH}\dot{I}_*$ визначає напрямок вектора $\dot{E}_{*f}$ (кут β) і напрямок осі $(-q)$ машини. Ось d випереджає вісь $(-q)$ на кут $\pi/2$.

Визначимо повздовжню й поперечну складові струмів, розкладаючи струм I_* по напрямках осей d і q : $I_{*d} = 2,1 \cdot 0,4 = 0,84$, $I_{*q} = 1,4 \cdot 0,4 = 0,56$.

За отриманим значенням складові токи визначимо відповідні їм ЕРС:

$$E_{*ad} = X_{*adH} I_{*d} = 1,35 \cdot 0,84 = 1,13; E_{*aq} = X_{*aqH} I_{*q} = 0,54 \cdot 0,56 = 0,3.$$

По продовженню прямолінійної ділянки характеристики холостого ходу знаходимо еквівалентні МРС збудження: $F_{*adm} = 1,04$ й $F_{*aqm} = 0,28$.

Розрахуємо МРС F_{*qdm} , еквівалентну розмагнічуючому впливу п

Щоб визначити результуючу МРС по повздовжній осі. спроекуємо $\dot{E}_{*r}$ на напрямок осі $(-q)$. Одержимо комплекс $\dot{E}_{*rd} = \dot{U}_* + jX_{*o}\dot{I}_* + jX_{*aqH}\dot{I}_{*q}$ По величині ЕРС $E_{*rd} = 5,6 \cdot 0,2 = 1,12$ за допомогою

характеристики холостого хода знаходимо величину $F_{*rdm} = 1,2$.

Повна МРС збудження

$$F_{*fm} = F_{*rdm} + F_{*adm} + F_{*qdm} = 1,2 + 1,04 + 0,064 = 2,3.$$

У масштабі $m_F = 0,2$ в.о./см ці складові МРС на діаграмі представляються відрізками $1,2/0,2 = 6$ см, $1,04/0,2 = 5,2$ см й $0,064/0,2 = 0,32$ см відповідно.

Шуканий струм збудження у відносних одиницях дорівнює повної МРС збудження

$$I_{*f} = F_{*fm} = 2,3.$$

Визначимо струм збудження при навантаженні з урахуванням зміни потоку розсіювання обмотки збудження. Для цього побудуємо часткові характеристики намагнічування (рис. 3.5) за даними додатка В. Виконаємо розрахунки й побудови, аналогічні попередньої. Відмінність складається у визначенні результуючої МРС по поздовжній осі.

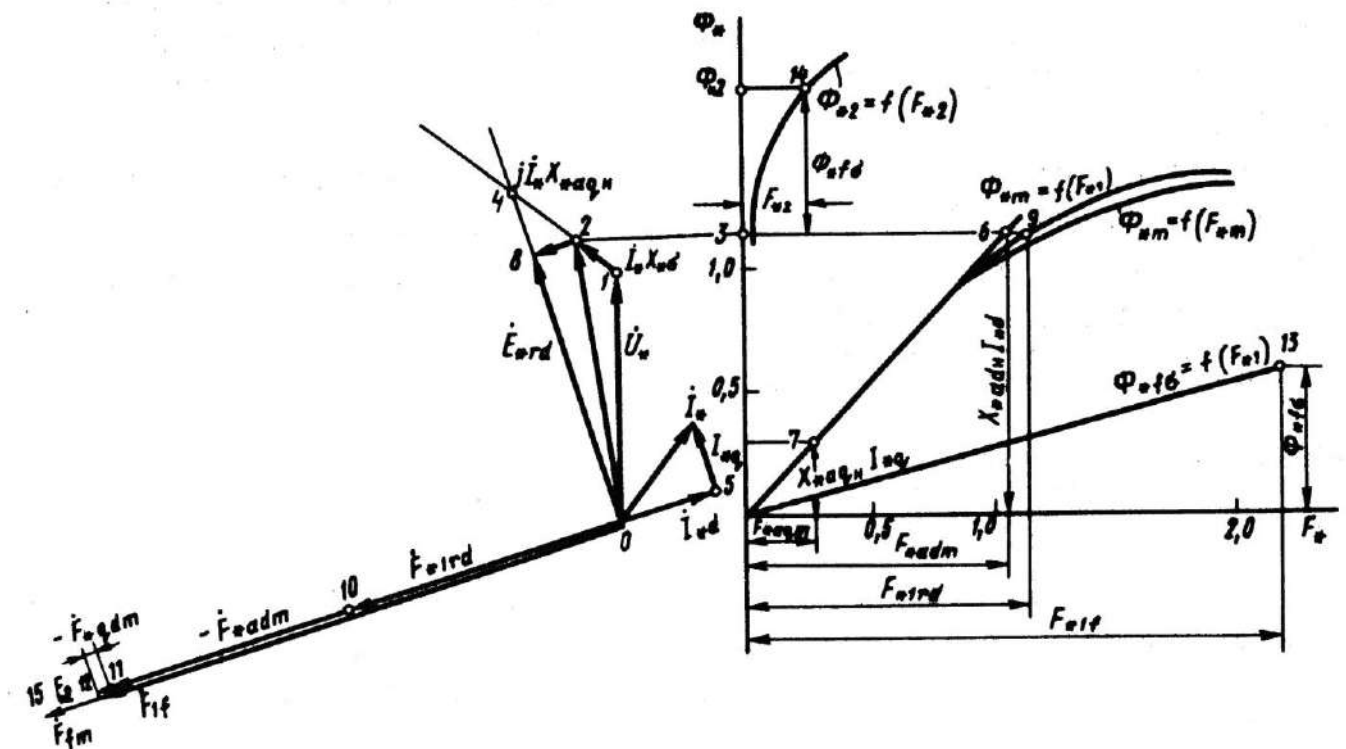


Рис. 3.5

За допомогою часткової характеристики $\Phi_{*m} = f(F_{*1})$ по величині $E_{*rm} = 1,12$ спочатку визначимо значення F_{*1rd} без врахування магнітної напруги ротора, $F_{*1rd} = 1,16$, а потім знайдемо МРС збудження F_{*1f} без обліку магнітної напруги ротора:

$$F_{*1f} = F_{*1rd} + F_{*adm} + F_{*qdm} = 1,16 + 1,04 + 0,064 = 2,264.$$

По частковій характеристиці $\Phi_{*f\sigma} = f(F_{*1})$ визначимо потік розсіювання $\Phi_{*f\sigma}$, що відповідає МРС F_{*1f} , $\Phi_{*f\sigma} = 0,6$.

Потік у полюсі

$$\Phi_{*2} = \Phi_{*rdm} + \Phi_{*f\sigma} = E_{*rd} + \Phi_{*f\sigma} = 1,12 + 0,6 = 1,72.$$

По частковій характеристиці $\Phi_{*2} = f(F_{*2})$ знайдемо відповідну магнітну напругу ротора $F_{*2} = 0,25$.

Повну МРС збудження й шуканий струм збудження у відносних одиницях визначимо як суму

$$I_{*f} = F_{*fm} = F_{*1f} + F_{*2} = 2,264 + 0,25 = 2,514.$$

Як видно, МРС збудження, визначена цим способом більша за МРС, що знайдена без обліку зміни потоку розсіювання обмотки збудження на величину $2,514 - 2,3 = 0,214$ в.о.

Відповідь: $I_{*f}(\Phi_{\sigma} = \text{var}) = 2,514$ $I_{*f}(\Phi_{\sigma} = \text{const}) = 2,3$.

Задача 3.3

Завдання ставиться до визначення й графічних побудов характеристик синхронного генератора при автономному навантаженні. Регулювальна характеристика генератора — це залежність струму збудження від струму якоря $I_f = f(I)$ при постійних напрузі, кутовій швидкості обертання в куті навантаження ($U = \text{const}$, $\Omega = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$). Без обліку насичення шукану характеристику можна одержати аналітично, для обліку насичення необхідні графічні побудови з використанням характеристики намагнічування, діаграми напруг і МРС.

Числові значення величин: $X_{*\sigma} = 0,122$; $X_{*a} = 1,44$; $R_l = 0$; $U_* = 1$; $\cos(\varphi) = 0,8$.

Характеристика холостого ходу визначається за даними додатка А (табл. 4).

Визначити $I_f = f(I)$ з обліком і без обліку насичення.

Рішення. Регулювальну характеристику без обліку насичення визначимо за допомогою вираження

$$E_f = \sqrt{(U \cos \varphi + RI)^2 + (U \sin \varphi + X_l I)^2}$$

яке у відносних одиницях для $U_* = 1$ та $R_* = 0$ запишеться у вигляді

$$E_{*f} = \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin^2 \varphi + X_{*1} I_*)^2}$$

Замість ЕРС E_{*f} уведемо струм збудження обумовлений по спрямленій нормальній характеристиці холостого ходу, побудованої за даними додатка А (табл. 3) у масштабі $m_E = 0,2$ в.о./см, $m_F = 0,2$ в.о./см.

Індуктивний опір якоря $X_{*1} = X_{*\sigma} + X_{*a} = 0,122 + 1,44 = 1,562$. Для заданого значення $\cos(\varphi) = 0,8$ аналітичне вираження регулювальної характеристики має вигляд

$$I_{*f} = 0,862$$

.

$$\sqrt{0,64 + (0,6 + 1,562I_*)^2}$$

Задаючись п'ятьма значеннями струмів I_* у діапазоні від 0 до 1, знайдемо відповідні значення струму збудження, результати зведемо до таблиці 3.1:

Таблиця 3.1

$I_* \dots$	0	0,25	0,50	0,75	1,0
$I_{*f} \dots$	0,862	1,10	1,376	1,675	1,987

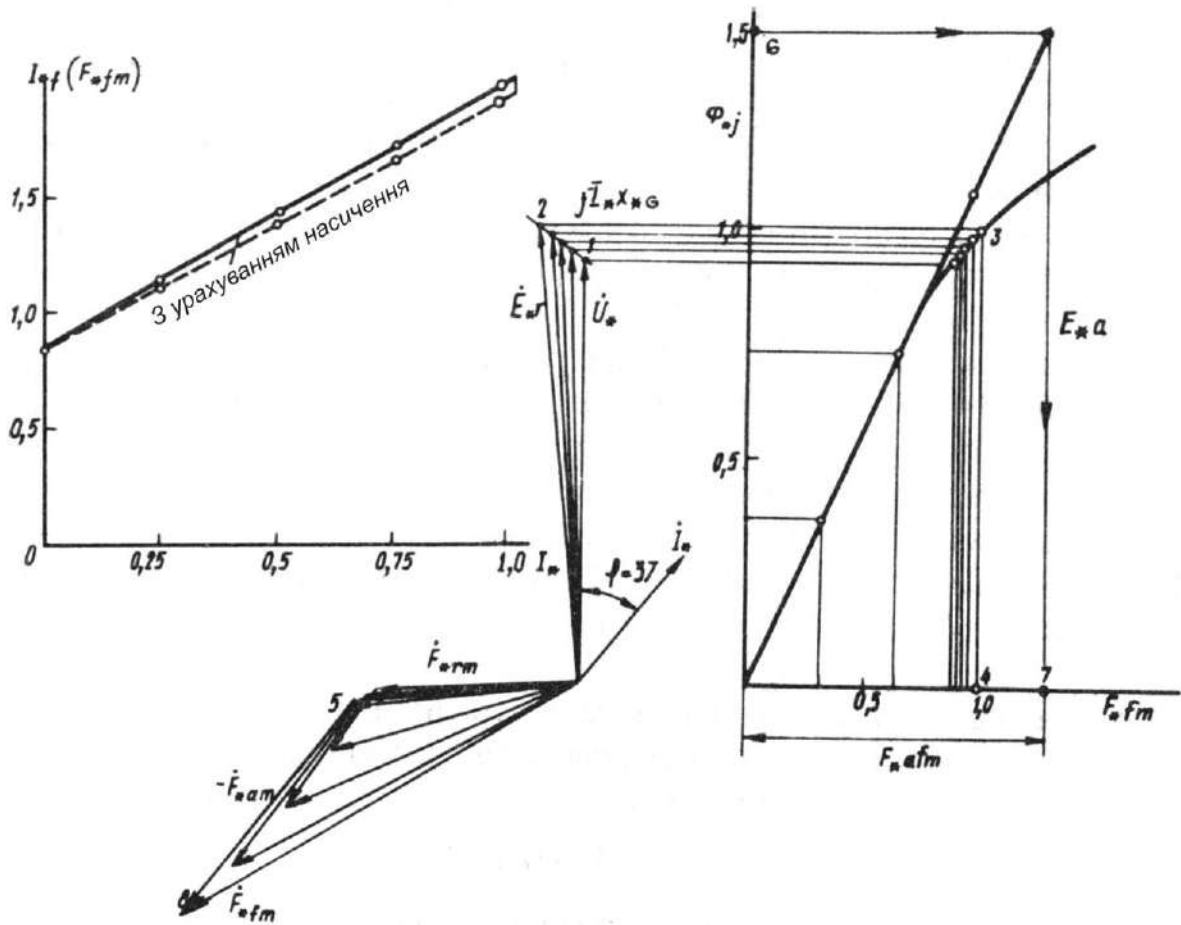


Рис. 3.6

Для обліку насичення при побудові регулювальної характеристики скористаємося діаграмою напруги й МРС. При цьому для правильної оцінки впливу насичення приймемо, що струм збудження в режимі холостого ходу I_{*f0} однаковий для обох випадків, $I_{*f} = 0,862$.

В обраному масштабі $m_E = 0,2$ в.о./см побудуємо комплекс напруги

$\dot{U}_* = 0,92$, що відповідає $\dot{F}_{*f} = 0,862$, і під кутом $\varphi = 37^\circ$ — вектор струму $\dot{I}_* = 1$

у масштабі $m_I = 0,4$ в.о./см.

Для струму $I^* = 1$ побудуємо комплекс $U^* + jI^*X_{*\sigma} = 0,92 + j 0,122$ у масштабі напруги U_E й одержимо вектор результуючої ЕРС $E_{*r} = 1$.

За допомогою основної характеристики намагнічування за значенням $E_{*r} = 1$ визначимо величину МРС $F_{*rm} = 1$, для чого відкладемо на діаграмі комплекс МРС $\dot{F}_{*m} = 1$ що опереджає $\dot{E}_{*r}$ на кут $\pi/2$.

За заданим значенням головного індуктивного опору X_{*a} визначимо ЕРС взаємної індукції $E_{*a} = X_{*a}I_{*a} = 1,44 \cdot 1 = 1,44$ і за допомогою спрямленої характеристики холостого ходу знайдемо значення еквівалентної МРС

збудження $\dot{F}_{*qm} = 6,7 \cdot 0,2 = 1,34$.

Враховуючи, що МРС F_{*afm} збігається по фазі зі струмом I^* , а $\dot{F}_{*m} = \dot{F}_{*fm} + \dot{F}_{*qm}$ визначимо графічно відносну величину МРС збудження F_{*fm} й

рівний їй по величині у відносних одиницях струм збудження $I_{*f} = I_{*fm} = 2$.

Повторивши зазначені вище дії для значення струмів $I_{*} = 0,75; 0,5; 0,25; 0$, одержимо п'ять крапок регулювальної характеристики, та зведемо їх до таблиці 3.2:

Таблиця 3.2

$I_{*} \dots$	0	0,25	0,5	0,75	1
$I_{*f \text{ нас}} \dots$	0,862	1,14	1,46	1,76	2,10
$I_{*f} \dots$	0,862	1,10	1,38	1,67	1,99

Третій рядок відповідає крапкам регулювальної характеристики, певної без обліку насичення.

Як видно, регулювальні характеристики, побудовані з обліком насичення, мало відрізняються від характеристик, розрахованих без обліку насичення.

Відповідь: дивись регулювальні характеристики.

Контрольні питання з теми «Синхронні електричні машини»

1. У чому полягає основна особливість СМ і яка область їхнього застосування?
2. Будова і призначення основних частин СМ.
3. Які відмінності в будові магнітопроводу й обмоток СМ у порівнянні з асинхронною?
4. У чому полягає принцип роботи синхронного генератора?
5. Конструктивні відмінності турбо- і гідрогенераторів.
6. Що розуміють під характеристикою холостого ходу генератора?
7. На підставі яких даних будують характеристику холостого ходу генератора?
8. Що розуміють під зовнішньою характеристикою синхронного генератора і як вона залежить від характеру навантаження?
9. Що розуміють під електромагнітною потужністю генератора і двигуна? Роль електромагнітного моменту в генераторі й у двигуні.
10. Що являє собою кутова характеристика? Яким діапазоном кута Θ обмежується її стійка частина?
11. Умови включення СМ паралельно до мережі.
12. Як впливає на режим роботи СМ регулювання струму збудження?
13. Як змінюється активне навантаження генератора, включеного паралельно мережі великої потужності?
14. При яких умовах СМ переходить у режим СД? В якому діапазоні

навантажень зберігається усталена робота СМ, ввімкненої паралельно з мережею?

15. Як впливає струм збудження ротора на коефіцієнт потужності СД? Проаналізуйте цей вплив за допомогою векторної діаграми.

16. Для яких цілей використовують синхронні компенсатори й у чому їхня відмінність від звичайних СМ?

17. Які залежності називаються робочими характеристиками СД і який характер вони мають?

18. Дайте порівняльну оцінку електромеханічних властивостей СД відносно асинхронного.

19. Обґрунтуйте доцільність застосування СД?

4.ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (4 ГОДИНИ)

4.1.Тема практичного заняття «Розв'язання задач»

Задача 4.1

Машина постійного струму в режимі двигуна має наступні номінальні дані: P_n ; U_n ; I_n ; R_a ; $I_{зб}$; n_n . Визначити необхідну швидкість обертання якоря МПС, що працює в режимі генератора з напругою U_g . Обчислити номінальну потужність цього генератора, якщо насичення сталі і нагрівання прийняти такими ж, як у двигуна. Вихідні дані наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_n , кВт	11	13	15	18	16	14	12	10	12	14	16
U_n , В	220	230	240	230	220	230	240	230	220	230	240
n_n , об/хв	1000	960	900	840	800	1100	1180	960	900	860	800
I_n , А	62	64	66	68	66	64	62	60	62	64	66
R_a , Ом	0,09	0,1	0,14	0,16	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,13	0,15
$I_{зб}$, А	3	3,4	3,6	3,8	4	3,8	3,6	3	3,2	3,4	3,6
U_g , В	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230

Розв'язання завдання для варіанта П

Визначаємо струм якоря двигуна й генератора

$$I_{я,дв} = I_n - I_{зб} = 62 - 3 = 59 \text{ А} = I_{н,г.}$$

Обчислюємо ЕРС двигуна й генератора без урахування падіння напруги в щітковому контакті:

$$E_{дв} = U_n - I_{я,дв} \cdot R_a = 220 - 59 \cdot 0,09 = 214,7 \text{ В};$$

$$E_g = U_g + I_{я,г} \cdot R_a = 230 + 59 \cdot 0,09 = 235,3 \text{ В}.$$

Швидкість обертання якоря генератора визначаємо із співвідношення

$$\frac{E_g}{E_{дв}} = \frac{c \cdot n_g \cdot \Phi_g}{c \cdot n_{дв} \cdot \Phi_{дв}} = \frac{n_g}{n_{дв}},$$

оскільки за умовою $\Phi_g = \Phi_{дв}$,

$$n_g = \frac{E_g}{E_{дв}} n_{дв} = \frac{235,3}{214,7} 1000 = 1096 \text{ об/хв.}$$

Якщо врахувати падіння напруги в щітковому контакті, наприклад при $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$, тоді

$$E'_{\text{дв}} = U_{\text{н}} - I_{\text{ядв}} \cdot R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{щ}} = 214,7 - 2 = 212,7 \text{ В},$$

$$E'_{\text{г}} = U_{\text{г}} + I_{\text{яг}} \cdot R_{\text{я}} + \Delta U_{\text{щ}} = 235,3 + 2 = 237,3 \text{ В},$$

і швидкість обертання повинна бути

$$n_{\text{г}} = \frac{E'_{\text{г}}}{E'_{\text{дв}}} n_{\text{дв}} = \frac{237,3}{212,7} 1000 = 1116 \text{ об/хв.}$$

Знаходимо номінальний струм і номінальну потужність:

$$I_{н.г} = I_{я.г} - I_{зб} = 59 - 3 = 56 \text{ А},$$

$$P_{нг} = U_{г} \cdot I_{нг} = 230 \cdot 56 = 12880 \text{ Вт} = 12,9 \text{ кВт}.$$

Задача 4.2

Визначити швидкість обертання якоря генератора з $P_{н} = 16,5 \text{ кВт}$, $U_{н} = 230 \text{ В}$, $n_{н.г} = 1460 \text{ об/хв}$, $R_{я} = 0,18 \text{ Ом}$, $R_{зб} = 82 \text{ Ом}$ при роботі двигуном з $U_{дв} = 220 \text{ В}$, якщо насичення сталі й нагрівання двигуна прийняти такими ж, як у генератора. Обчислити електромагнітну потужність двигуна. Вихідні дані наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Параметр	Варіант завдання										
	П	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{нг}$, кВт	16,5	18	20	22	21	19	17	15	16	18	20
$U_{н.г}$, В	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230
$n_{н.г}$, об/хв	1460	1400	1540	1500	1460	1400	1540	1600	1500	1460	1400
$R_{я}$, Ом	0,18	0,2	0,22	0,21	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16	0,18	0,2
$R_{зб}$, Ом	82	84	86	85	83	81	80	82	84	85	83
$U_{дв}$, В	220	220	220	230	210	220	210	220	210	220	220

Розв'язання задачі для варіанта П

Знаходимо струм якоря генератора й двигуна:

$$I_{я.г} = I_{н} + I_{зб} = P_{н.г} / U_{н.г} + U_{н} / R_{зб} = 16500 / 230 + 230 / 82 = 72 + 2,8 = 74,8 \text{ А}$$

$I_{я.дв} = I_{я.г}$ (за умовою завдання). Струм, споживаний двигуном з мережі, дорівнює

$$I_{дв} = I_{я.дв} + I_{зб} = 74,8 + 2,8 = 77,6 \text{ А}.$$

Обчислюємо ЕРС генератора й двигуна:

$$E_{г} = U_{н.г} + I_{я.г} \cdot R_{я} = 230 + 74,8 \cdot 0,18 = 243,5 \text{ В};$$

$$E_{дв} = U_{дв} - I_{я.дв} \cdot R_{я} = 220 - 74,8 \cdot 0,18 = 206,5 \text{ В}.$$

Швидкість обертання якоря двигуна знаходимо із співвідношення

$$n_{дв} = \frac{E_{дв}}{E_{г}} n_{н.г} = \frac{206,5}{243,5} 1460 = 1238 \text{ об/хв}.$$

Визначаємо електромагнітну потужність двигуна:

$$P_{ем} = E_{дв} \cdot I_{я.дв} = 206,5 \cdot 74,8 = 15446 \text{ Вт} = 15,5 \text{ кВт}.$$

Номінальна потужність двигуна буде трохи меншою.

Контрольні питання з теми «Електричні машини постійного струму»

1. Назвіть основні частини машини постійного струму, поясніть її конструкцію.
2. Поясніть принцип дії генератора постійного струму і призначення колектора у генератора та у двигуна.
3. Як можна змінити ЕРС генератора?
4. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму.
5. Запишіть рівняння противо- ЕРС і струму якоря двигуна.
6. Виведіть рівняння обертового моменту двигуна. Як змінити напрямок обертання якоря двигуна?
7. Виведіть рівняння швидкості двигуна і поясніть можливості її регулювання.
8. Поясніть призначення пускового реостата й вибір величини його опору.
9. Особливості схеми двигуна з паралельним збудженням.
10. Поясніть регулювання швидкості двигуна зміною струму збудження. Чому розрив кола збудження небезпечний для двигуна?
11. Поясніть регулювання швидкості двигуна з паралельним збудженням зміною напруги на якорі.
12. Як змінюється швидкість двигуна з послідовним збудженням при зміні навантаження на його валу? Чому робота з малим навантаженням для двигуна є неприпустимою?
13. Поясніть, як регулюють швидкість двигуна з послідовним збудженням.
14. Як змінюються обертовий момент і швидкість двигуна із змішаним збудженням із зростанням навантаження?
15. Які з втрат у машині постійного струму залежать від навантаження? Які втрати є постійними?

ДОДАТОК А

Таблиця 3 – Дані нормальних характеристик холостого ходу й намагнічування неявнополюсних синхронних машин

F^*	0,0	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\Phi_{*m}(E_{*f}) = f(F_{*fm})$	0,0	0,116	0,29	0,58	0,83	1,0	1,2	1,33	1,4	1,46	1,51
$\Phi_{*m} = f(F_{*1})$	0,0	0,116	0,29	0,58	0,84	1,02	1,28	1,47	1,64	-	-
$\Phi_{*m}(E_{*f}) = f(F_{*\delta})$	0,0	0,116	0,29	0,58	0,87	1,16	1,74	2,32	-	-	-
$\Phi_{*f\sigma} = f(F_{*1})$	0,0	0,005	0,0115	0,023	0,034	0,046	0,069	0,091	0,114	0,137	0,16
$\Phi_{*2} = f(F_{*2})$	0,0	1,22	1,34	1,42	1,48	1,54	1,63	-	-	-	-

ДОДАТОК Б

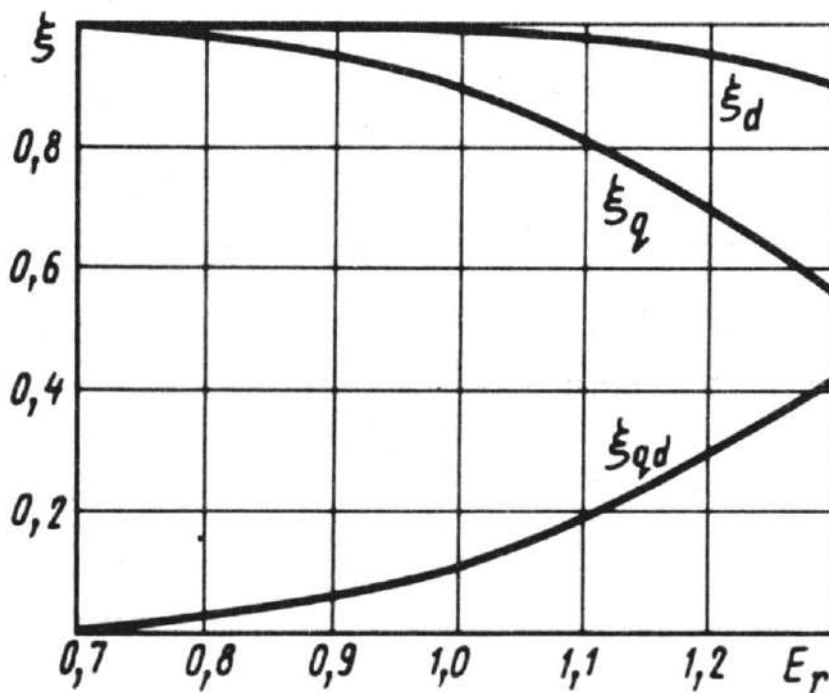


Рис. Б1 – Залежності ξ_d , ξ_q , ξ_{qd} від E_r

ДОДАТОК В

Таблиця В1 – Дані нормальних характеристик холостого ходу й намагнічування явнополюсних синхронних машин

F_*	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
$\Phi_{*m}(E_{*f}) = f(F_{*fm})$	0,0	0,106	0,212	0,318	0,53	0,8	1,0	1,125	1,23	1,26	1,3
$\Phi_{*m}=f(F_{*1})$	0,0	0,106	0,212	0,318	0,53	0,8	1,0	1,2	1,28	1,31	1,35
$\Phi_{*m}(E_{*f}) = f(F_{*\delta})$	0,0	0,106	0,212	0,318	0,53	0,8	1,06	1,325	1,59	1,855	2,12
$\Phi_{*f\sigma}=f(F_{*1})$	0,0	0,026	0,052	0,078	0,131	0,196	0,262	0,328	0,393	0,458	0,525
$\Phi_{*2}=f(F_{*2})$	0,0	1,5	1,675	1,75	-	-	-	-	-	-	-

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Базова

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2011. – 464 с.
2. Белікова Л. Я. Електричні машини : навчальний посібник для студ. вищ. навч. закладів / Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – Одеса : Наука і техніка, 2012. – 480 с.
3. Электрические машины переменного тока : учебное пособие для студентов факультета последипломного образования и студентов дневной и заочной формы обучения специальности 6.090603 – Электрические системы электроснабжения, 6.090605 – Светотехника и источники света, 6.092202 – Электрический транспорт / М. Л. Глебова, М. В. Чернявская, А. И. Кузнецов, И. Т. Карпалюк. – Харків : ХНАГХ, 2008. – 102 с.
4. Синхронные машины. Машины постоянного тока : конспект лекций для студентов 3 курса направления подготовки 0922, 6.050702 – Электромеханика специальности «Электрический транспорт» / М. Л. Глебова, М. В. Чернявская, А. И. Кузнецов, И. Т. Карпалюк. – Харків : ХНАГХ, 2009. – 237 с.
5. Рисованый С. В. Проектирование вентильных реактивных двигателей / С. В. Рисованый, В. Б. Финкельштейн. – Харків, 2013 – 242 с.
6. Глебова М. Л. Методичні вказівки до самостійного вивчення дисципліни «Електричні машини» для студентів усіх форм навчання напряму 6.050702 – Електромеханіка / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва; уклад. : М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, Я. Б. Форкун. – Харків : ХНУМГ, 2014 – 32 с.

Допоміжна

1. Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини): Лабораторний практикум з дисципліни «Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини) для студентів спеціальності 6.091901 – «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/Укл.: М.О. Чуєнко, Р.М. ЧуєнкоЮ, А.Г. Кушніренко. – Ніжин, 2009. – 276 с.
2. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

Рясна Ольга Василівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки з практичних занять

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г.-Кондратьєва 160

Підписано до друку: ____ 2023 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman Cyr
Тираж: 25 примірників Замовлення ____ № ____ Ум. друк. арк. 2,9