

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання практичних робіт

із навчальної дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

за розділом

«МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт із навчальної дисципліни «Електричні машини» за розділом «Машини змінного струму» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 42 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент

О. М. Петренко, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 12 від 20.06.2024.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Трансформатори.....	5
1.1 Тема практичного заняття «Розв’язання задач» (4 години).....	7
Контрольні запитання за темою «Трансформатори».....	8
2 Асинхронні електричні машини (4 години).....	9
2.1 Тема практичного заняття «Побудова кругової діаграми та робочих характеристик трифазної асинхронної машини».....	9
2.2 Тема практичного заняття «Дослідження трифазного асинхронного двигуна під навантаженням. Розрахунок робочих характеристик».....	12
2.3 Тема практичного заняття «Визначення втрат і ККД трифазного асинхронного двигуна з дослідження холостого ходу».....	14
2.4 Тема практичного заняття «Розв’язання задач».....	17
Контрольні запитання за темою «Асинхронні електричні машини».....	20
3 Синхронні електричні машини (4 години).....	22
3.1 Практичне заняття «Розрахунок індуктивних опорів обмотки статора трифазної синхронної машини».....	22
3.2 Практичне заняття «Побудова характеристик синхронного генератора під час його роботи на автономне навантаження. Побудова векторної діаграми Потьє».....	23
3.3 Практичне заняття «Електромагнітні процеси в електричних та магнітних колах синхронних машин в режимі холостого ходу та навантаження. Розв’язання задач».....	27
Контрольні запитання за темою «Синхронні електричні машини».....	35
4 Електричні машини постійного струму.....	36
4.1 Тема практичного заняття «Розв’язання задач» (2 години).....	36
Контрольні питання за темою «Електричні машини постійного струму».....	38
Список рекомендованої літератури	39
Додатки.....	40

ВСТУП

Ці методичні рекомендації складені на основі робочих програм з дисципліни «Електричні машини» спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Мета: формування у студентів знань і практичних навичок у сфері використання електричних машин різних типів.

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

Метою викладання навчальної дисципліни «Електричні машини» є формування теоретичних знань та практичних навичок у галузі електричних машин та трансформаторів, їхніх електричних та механічних властивостей, енергетичних і теплових процесів, що спостерігаються під час їхньої роботи.

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

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 їхній 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 їхнього 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.

1 ТРАНСФОРМАТОРИ

1.1 Тема практичного заняття «Розв'язання задач» (4 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 $I_{1ном}$ і $I_{2ном}$ в обмотках однофазного трансформатора з номінальною потужністю $S_{1ном}$, підключеного до живильної мережі з напругою $U_{1ном} = 127$ В, напруга на затискачах вторинної обмотки при холостому ході U_{20} . Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_2 , витків	40	50	60	70	80	80	70	60	60	40	50
$S_{1ном}$, кВА	3	3,6	4	6	10	5	6,6	6	4,4	3,8	4,2
$U_{1ном}$, 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 К

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 $S_1 \cong S_2$):

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

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

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

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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_1 , витків	2 002	1 980	1 200	1 600	1 400	2 300	2 000	1 900	1 800	1 700	1 980
w_2 , витків	134	126	100	106	94	140	130	127	120	112	126
$U_{1л.ном}$, В	6 000	6 000	3 300	3 300	3 300	10 000	10 000	6 000	6 000	6 000	6 000

Розв'язання задачі для варіанта К

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»:

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

– 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»:

– лінійний $n_{Y.l} = U_{1л.ном} / U_{2л.ном} = 6000 / 400 = 15;$

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

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

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

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

Задача 1.3

Трифазний трансформатор має потужність $S_{ном}$, номінальні напруги первинної і вторинної обмоток $U_{1.ном}$, $U_{2.ном}$ за частоти мережі $f = 50 \text{ Гц}$. Втрати

холостого ходу за номінальної напруги $P_{xx} = 180$ Вт, втрати короткого замикання $P_{кз} = 1\ 000$ 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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{ном}$, кВа	40	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1л.ном}$, кВ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2л.ном}$, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
P_{xx} , кВт	0,18	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$P_{кз}$, 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 К

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

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{MH} \cdot \beta^2} = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + P_{xx} + P_{кз} \cdot \beta^2} =$$

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

Результати розрахунку для інших значень коефіцієнта навантаження приведені в таблиці 1.4. На рисунку 1.1 побудована залежність ККД від коефіцієнта навантаження трансформатора.

Таблиця 1.4 – Дані до побудови залежності ККД від β

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

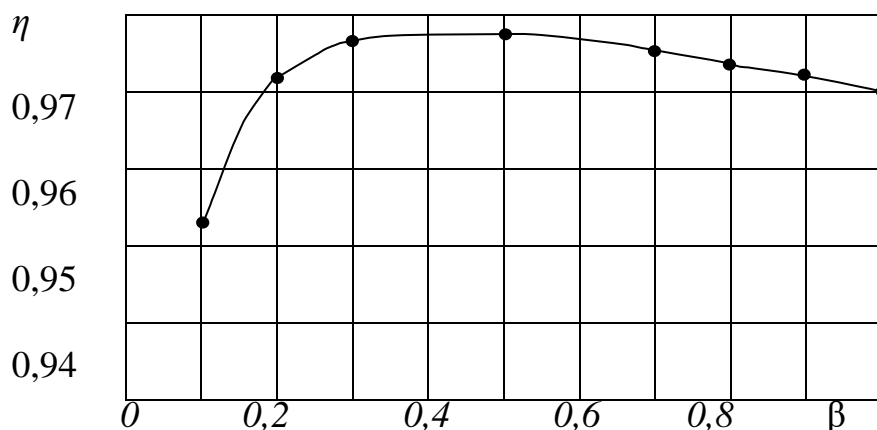


Рисунок 1.1 – Розрахункова залежність ККД від β

Контрольні запитання за темою «Трансформатори»

1. Поясніть призначення і принцип дії трансформатора.
2. Чому магнітопровід трансформатора виконують з електротехнічної а не зі 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 досліди 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?
10. Які переваги й недоліки автотрансформаторів порівняно з трансформаторами?

2 АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ (4 ГОДИНИ)

2.1 Тема практичного заняття «Побудова кругової діаграми та робочих характеристик трифазної асинхронної машини»

Типові випробування виготовлених АД передбачають експериментальну перевірку коефіцієнта корисної дії (далі – ККД), $\cos\varphi$, 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 досліди 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 проєктування після розрахунку параметрів х. х. і к. з.

Кругову діаграму будують так. Вертикально проводять вектор \dot{U}_1 , вибирають масштаб струму m_i (А/мм). Під кутом φ_0 до \dot{U}_1 будують вектор \dot{I}_0 . Кінцем вектора є точка Н. Під кутом φ_k до \dot{U}_1 будують вектор \dot{I}_k (точка К). З середини прямої НК (точка М) проводять перпендикуляр до перемикання з прямою НС, паралельною осі ординат. Точкою перемикання O_2 є центр кола струму. Із точки O_2 радіусом $O_2Н = O_2К$ проводять коло – уявне, геометричне місце кінців вектора \dot{I}_1 за різного навантаження машини. Якщо додатково провести ряд ліній, то вийде кругова діаграма, за допомогою якої визначають різні параметри асинхронної машини (рис. 2.1).

Пряма НК – лінія корисної потужності P_2 , ось ординат – лінія підведеної потужності P_1 . Якщо вертикаль KK_3 розділити точкою K_2 у відношенні $\frac{KK_3}{K_2K_3} = \frac{r_k}{r_1}$, то пряма НК₂ буде лінією електромагнітної потужності P_{em} , і моменту M_{em} , де $r_1 = 2,3$ Ом; r_k з таблиці 2.1; KK_3 , K_2K_3 визначається з рисунку 2.1.

Лінія $\cos\varphi$ є півколом із діаметром $Of = 100$ мм, що лежить на осі ординат. Шкала ковзання – це відрізок QF прямої, паралельної лінії електромагнітної потужності, замкнений між вертикаллю через точку Н і лінією корисної потужності. Масштаби потужності m_p і моментів m_m знаходять за формулами:

$$m_p = 3m_1 U_{\phi n} \left(\frac{Bm}{mm} \right); m_m = 0,975 \frac{m_p}{n_c} \left(\frac{кГМ}{мм} \right),$$

де 3 – число фаз обмотки статора;

n_c – синхронна швидкість (об/хв).

Різні параметри за допомогою кругової діаграми знаходять так. Один кінець циркуля ставлять на початок координат, а другим кінцем на колі струмів роблять позначки $0,7I_n$, I_n , $1,5I_n$, $2I_n$ – у масштабі струму. Для різних режимів параметри знаходять однаково. Покажемо це для струму, якому відповідає, наприклад, точка D .

Потужність або момент дорівнює відрізку по вертикалі між колом струму і відповідною лінією: D_b – корисна, D_c – електромагнітна, D_a – підведена потужність. Пряма ND перетинає QF в точці S . Ковзання S дорівнює відношенню $\frac{QS}{QF}$.

Пряма OD перетикає півколо в точці h , $\cos\varphi = \frac{oh}{of}$ – коефіцієнт потужності.

Якщо провести $O_2q \perp NK_2$ то qn у масштабі моментів є максимальним електромагнітним моментом двигуна. Пусковий момент визначається відрізком KK_2 . Для побудови залежності моменту від ковзання потрібно знайти M_{EM} та S ще для точки між пусковим і максимальним моментом.

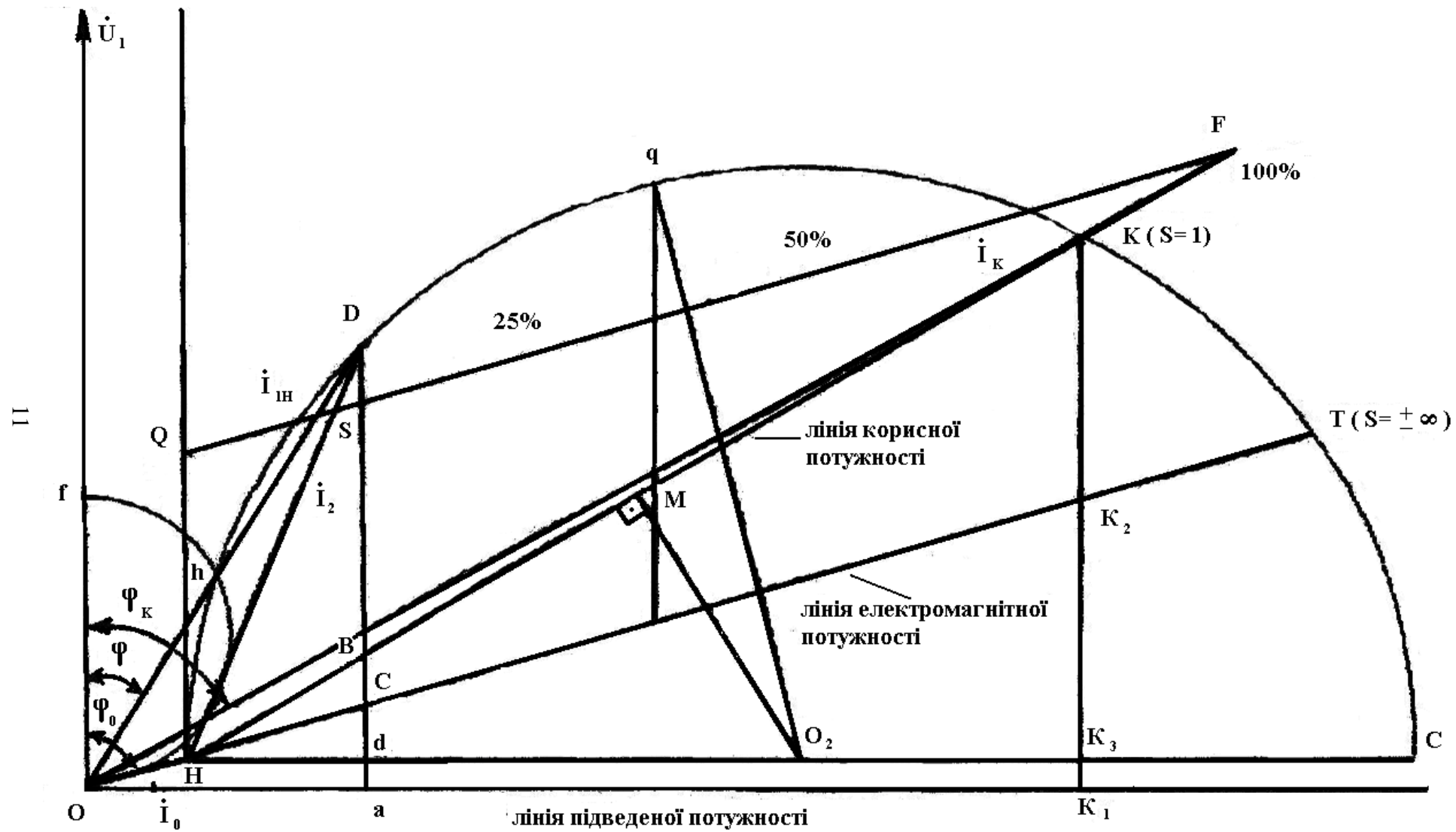


Рисунок 2.1 – Кругова діаграма асинхронної машини

Таблиця 2.1 – Дані для побудови кругової діаграми

Варіант	I_{φ_0}	$\cos\varphi_0/\varphi_0$	I_{φ_k}	$\cos\varphi_k/\varphi_k$	r_k	m_i	m_p	m_M
	А	-/град.	А	-/град.	Ом	А/мм	Вт/мм	кГм/мм
1	4,3	0,087/85°	30	0,5/60°	4			
2	3,8	0,242/76°	28	0,64/50°	4,5			
3	2,8	0,17/80°	24	0,57/55°	4			
4	3,2	0,1/84°	26	0,5/60°	4,3			

2. Побудувати кругову діаграму (радіус кола не менше 150 мм), вибрати п'ять точок, для кожної знайти параметри, та занести до таблиці 2.2 й зобразити графічно.

Таблиця 2.2 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

I, A	$\frac{\cos\varphi}{\varphi^\circ}$	$\eta \%$	$S \%$	P_2 кВт	P_1 кВт	$M_{ЭМ}$ кг · м
$\frac{0,5I_H}{3,06A}$						
$\frac{0,7I_H}{4,27A}$						
$\frac{1I_H}{6,1A}$						
$\frac{1,5I_H}{9,15A}$						
$\frac{2I_H}{12,2A}$						

2.2 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 потрібно 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 $\sqrt{3}$ зменшиться U , в $\sqrt{3}$ разів фазний струм менший за 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), потрібно 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 (намагнічувальний 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

Схема	Ввімкнення SA	Показання К-540												
		α_i	U_A	I_A	P_A	U_B	I_B	P_B	U_C	I_C	P_C	$U_{a, B}$	$I_{a, A}$	$n, \text{об/хв}$
Δ	5012	10												
	501	5												
	50	2.5												
	5	2.5												
Y	5012	10												
	501	5												
	50	2.5												
	5	2.5												

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку. Робочі характеристики АД

Схема	$I_{1\phi}$	P_1	$\cos\varphi$	P_2	η	M_2	S
	А	Вт	–	Вт	–	кГм	–
Δ							
Y							

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

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

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

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

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

де $R_a = 4$ Ом, $P_{xx} = 100$ Вт.

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 , $S = f(P_2)$.

2.3 Тема практичного заняття «Визначення втрат і ККД трифазного асинхронного двигуна з дослідження 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).

$$\sum P = P_{\text{мех}} + P_{\text{м2}} + P_E + P_{\text{доод}}.$$

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 отже, залишаться 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_x електричні втрати в обмотці статора $P_{E0} = 3r_1 I_{\text{оф}}^2$ (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_E можна користуватися наближеною Г-подібною схемою заміщення, що складається із двох паралельних віток: намагнічувальної із струмом I_0 та навантажувальної 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:

$$I_{1\phi} = \sqrt{(I_{1\phi} \cos \varphi_0 + I_2')^2 + (I_{1\phi} \sin \varphi_0)^2}.$$

Електричні втрати в обмотках статора і ротора:

$$P_{E1} = 3r_{1\phi} I_{1\phi}^2 ; P_{E2} = 3r_2 I'^2_{2\phi}$$

Корисна потужність:

$$P_2 = \frac{1-S}{S} P_{E2} - P_{мех}.$$

Споживана потужність:

$$P_1 = 1,005(P_2 + P_{E1} + P_{E2} + P_{M2} + P_{мех}),$$

де 1,005 – врахування 0,5 % додаткових втрат.

Таблиця 2.5 – Вихідні дані асинхронного двигуна в режимі холостого ходу

Схеми		α_i	U_A	I_A	P_A	U_B	I_B	P_B	U_C	I_C	P_C
трансф.	А.Д.										
Y/Y	Y	2,5	75	36	17	72	40	18	76	40	19
Y/ Δ	Y	2,5	44	46	13	42	44	14	43	44	15
Δ /Y	Y	2,5	142	54	27	142	52	28	142	52	29
Δ /Y	Δ	10	140	62	12	140	60	12	140	60	12

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку. Втрати в сталі і механічні

$U_{1\phi}$	$I_{0\phi}$	$\cos\varphi$	P_X	$P_{ЭС}$	$P_{M2} + P_{мех}$	$P_{мех} = \text{const}$	$P_{ст}(P_{M2})$
В	А	–	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку. Втрати і ККД

S	$P_{M2} = \text{const}$	$P_{мех} = \text{const}$	I_1	I'_2	P_{E1}	P_{E2}	P_2	P_1	H
–	Вт	Вт	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	–
0,02									
0,04									
0,06									
0,08									
0,1									

Середні параметри розраховують за такими формулами:

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

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

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

2.4 Тема практичного заняття «Розв'язання задач»

Задача 2.1

Багатополюсний 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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	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 К

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

$$n_1 = f_1 \cdot 60/p = 50 \times 60/3 = 1\,000 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = 1\,000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ об/хв.}$$

Задача 2.2

Швидкість обертання асинхронного двигуна при номінальному навантаженні становить n_2 об/хв, при холостому ході – $n_{\text{хх}}$ об/хв. Визначити ковзання при навантаженні й холостому ході; $f_1 = 50$ гц. Шкала частот обертання: 3 000, 2 200, 1 600, 1 500, 1 000, 850, 800, 750, 650, 600 об/хв. Вихідні дані наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_{\text{хх}}$, об/хв	2 940	2 160	1 550	820	630	580	580	740	730	780	840
n_2 , об/хв	2 850	2 040	1 320	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 К

Синхронна швидкість для такого двигуна $n_1 = 3\ 000$ 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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	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 К

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

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

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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	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 К

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

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

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

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

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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	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 К

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

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

Контрольні запитання за темою «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 спостерігаються в АД? Що розуміють під електромагнітною й механічною потужністю двигуна?
17. Визначить поняття «номинальна 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.
21. Що розуміють під коефіцієнтом перевантажувальної здатності і яка його величина для звичайних АД?

22. Поясніть умову усталеної роботи двигуна.
23. Від чого і як залежить критичний момент і критичне ковзання?
24. Які є можливості впливу на механічну характеристику АД?
25. За якими показниками оцінюють пускові властивості двигуна?
26. Позитивні якості й недоліки прямого пуску асинхронних короткозамкнених двигунів.
27. Позитивні якості й недоліки запуску двигунів на зниженій напрузі.
28. Як пускають у хід двигуни з контактними кільцями? Дайте загальну оцінку їхніх пускових властивостей.
29. Що розуміють під робочими характеристиками двигуна? Поясніть характер цих залежностей для АД.
30. Умова переходу асинхронного двигуна до генераторного режиму. Поясніть практичне значення такого режиму.
31. Які можливі способи гальмування асинхронного двигуна? Дайте їхню оцінку й поясніть практичне значення.
32. Поясніть будову і принцип дії однофазного АД.
33. Як пускають у 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 слугує для створення основного магнітного потоку Φ_o , 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_o 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. За невеликої 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, чинить розмагнічувальну дію. Тому X_2 менше X_d і X_q .

Струми нульової послідовності не зрушені за фазою і не створюють обертального потоку, тому дослід із визначення 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 $X_d > X_q$). Під час проведення цього досліду 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 під час його роботи на автономне навантаження.

Побудова векторної діаграми Потьє»

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 ніж на чверть своєї номінальної потужності. Основні характеристики знімаються за постійної частоти обертання і постійного коефіцієнта 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 $I_c = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$; $n = \text{const}$.

За активного навантаження напруга на затискачах генератора зменшується порівняно з її значенням при х. х. шляхом падіння напруги в ланцюзі якоря і завдяки розмагнічувальній 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-намагнічувальна (при ємнісному навантаженні), подовжньо-розмагнічувальна (при індуктивному навантаженні). Тому за різних видів навантаження будуть різні значення номінальної зміни напруги під час переходу від х. х. до номінального режиму:

$$U \% = ((U_0 - U_H) / U_H) 100 \% ;$$

4) характеристика к. з. становить залежність струму короткозамкненої статорної обмотки від струму збудження за постійної частоти 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-розмагнічувальна. 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.

збудження, сторона CC' – падіння напруги в індуктивному опорі розсіювання обмотки статора у відносних одиницях.

Якщо зняти навантажувальну характеристику для номінального струму, то

$$E_{\sigma} = I_{нф} x_{\sigma} / U_{нф} = x_{\sigma} / z_{н},$$

тобто відрізок CC' становить індуктивний опір розсіювання у відносних одиницях x_{σ} . Після зняття навантажувальної характеристики для струму $I_{сф}$, відмінного від номінального, індуктивне розсіювання визначаємо в омах як

$$x_{\sigma} = CC' U_{нф} / I_{сф},$$

а потім виражаємо у відносних одиницях:

$$X_{\sigma} = x_{\sigma} / z_{н}.$$

Під час роботи генератора під навантаженням в обмотці статора індуються такі 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:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_{\sigma} = \dot{I}_c r_1 + \dot{U}_c.$$

Позначивши

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

одержимо

$$\dot{E}_{\delta} - j \dot{I}_c x_{\sigma} = \dot{U}_c \quad (\dot{I}_c r_1 \approx 0).$$

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° . Під час побудови діаграми бажано масштаби для її векторів вибирати такими саме, 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 x_{σ} відповідно E_{δ} знаходимо результуючу МРС $\dot{F}_{в\delta} = \dot{F}_{в0} + \dot{F}_{в\delta}$, тобто результуюча МРС складається з МРС, створюваної обмоткою збудження $I_{в0}$, і МРС, створюваної обмоткою статора $I_{в\delta}$ (МРС беруть у масштабі струму збудження).

З рівняння рівноваги МРС визначаємо МРС обмотки збудження $I_{в0}$, а за характеристикою x_{σ} відповідну їй ЕРС E_0 (рис. 3.2).

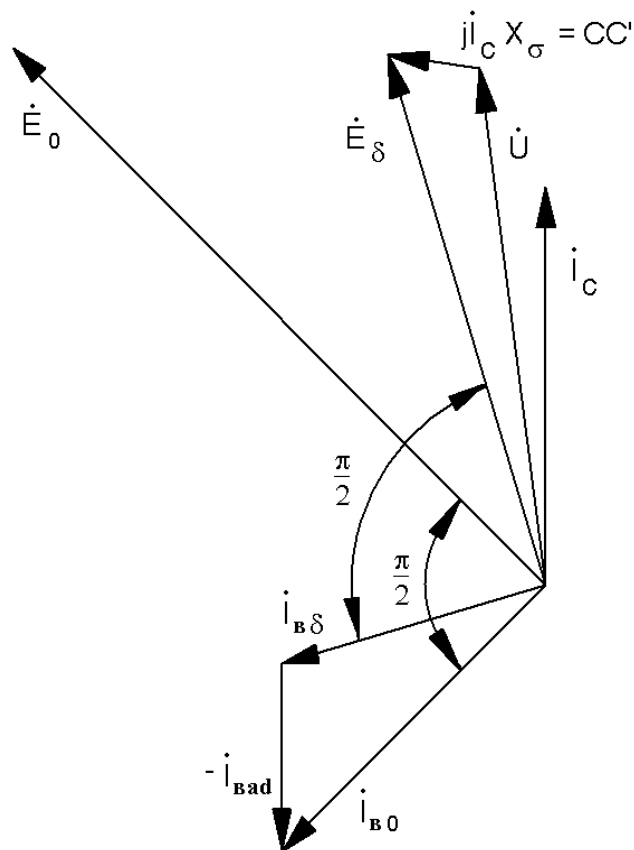


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма Потьє

Номінальна зміна напруги у відсотках:

$$\Delta U_n \% = (E_0 - U_n) / U_n \cdot 100 \%$$

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 кривої 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: $F_{fm} = 26\ 000\ \text{A}$; $D_i = 145\ \text{см}$; $l_\delta = 200\ \text{см}$; $\delta' = 3,5\ \text{см}$; $\rho = 0,76$; $2p = 2$.

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, утвореної цією обмоткою при протіканні в ній струму збудження, представимо східчастою кривою. При цьому на необмотаній частині полюса (великий зуб) МРС обмотки незмінна.

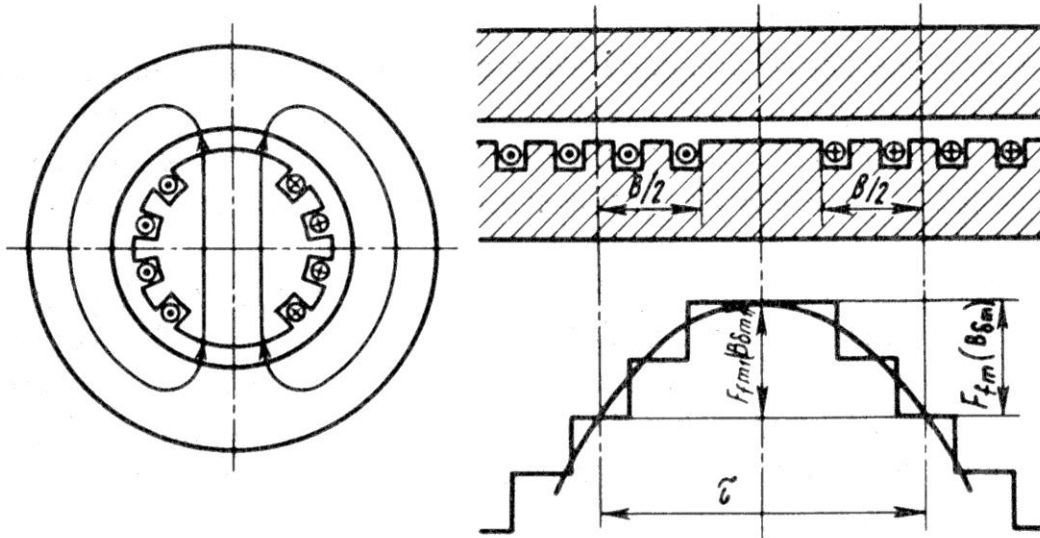


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення синхронної машини

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:

$$B_{\delta m} = \mu_0 F_{fm} / \delta' = 4\pi \times 10^{-7} \times 26\,000 / (3,5 \times 10^{-2}) = 0,933 \text{ Тл.}$$

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

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

$$\text{Відповідно } B_{\delta 1m} = B_{\delta m} k_f = 0,933 \times 0,992 = 0,926 \text{ Тл.}$$

Повний потік взаємної індукції

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

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

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

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

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

звідки нове значення відносної довжини обмотаної частини полюса

$$\rho = [1 - (2/\pi) \cdot k_f] 2 = 2 [1 - (2/\pi) \cdot 0,992] = 0,736.$$

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 під час навантаження й пов'язана з обліком впливу поля якоря на поле збудження при насичені. Рішення завдання проводиться графоаналітично із застосуванням векторних діаграм.

Числові значення величин: $X_{ad} = 1,4$; $X_{aq} = 0,7$; $X_{as} = 0,2$; $R_s = 0$; $U_s = 1$; $I_s = 1$; $\cos(\varphi) = 0,8$.

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 330 мм × 200 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 будемо 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 $\varphi = 37^\circ$ будемо вектор струму $I_* = 1$ у довільному масштабі (тут $m_I = 0,4$ в.о./см).

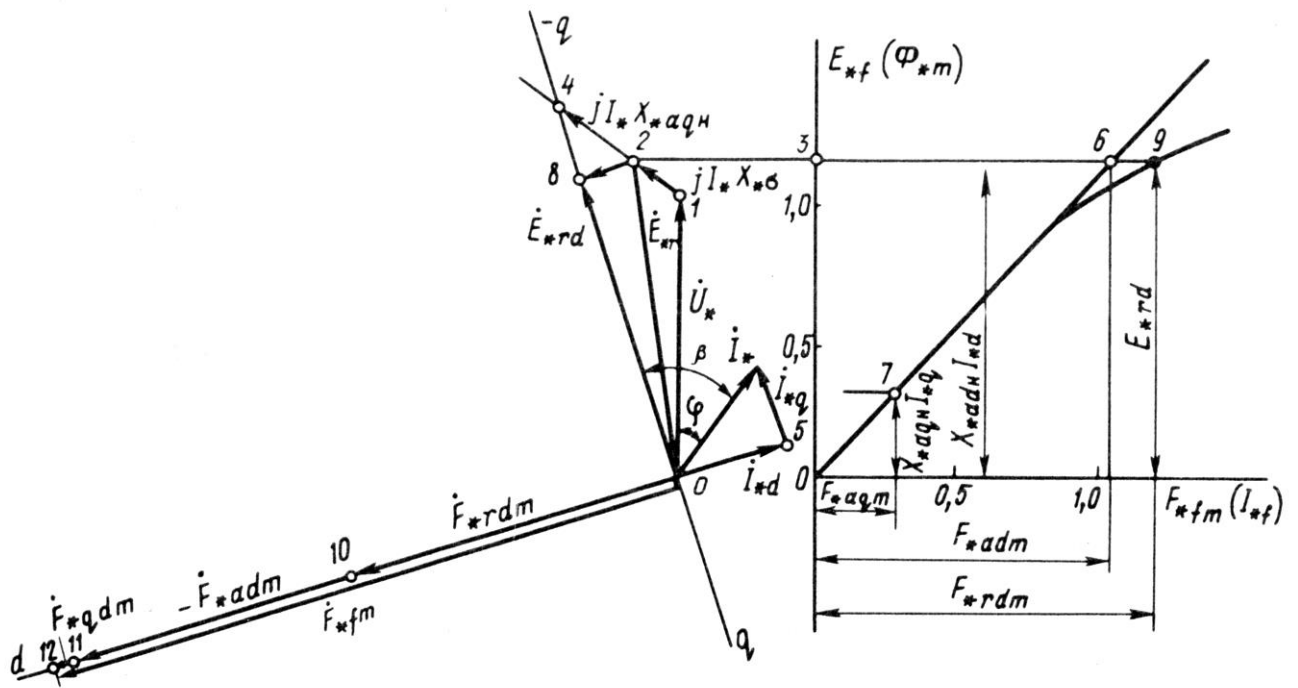


Рисунок 3.4 – Характеристик намагнічування

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

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:

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

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

До вектора \dot{E}_r додамо вектор $jX_{*aqn}I_*$, довжина якого в масштабі напруги $X_{*aqn}I_* / m_E = 0,54 \cdot 1 / 0,2 = 0,54 / 0,2 = 2,7$ см. Кінець комплексу $\dot{E}_{*r} + jX_{*aqn}I_*$ 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: $E_{*ad} = X_{*adn} I_{*d} = 1,35 \cdot 0,84 = 1,13$; $E_{*aq} = X_{*aqn} I_{*q} = 0,54 \cdot 0,56 = 0,3$.

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 розмагнічувальному впливу поперечної МРС на повздовжнє поле: $F_{*qdm} = \xi_{dq} F_{*aqm} = 0,23 \cdot 0,28 = 0,064$.

Щоб визначити результуючу МРС по поздовжній осі \dot{F}_{*rd} , спроекуємо \dot{E}_{*r} на напрямок осі $(-q)$. Одержимо комплекс $\dot{E}_{*rd} = \dot{U}_* + jX_{*\sigma} \dot{I}_* + jX_{*aqf} \dot{I}_{*q}$. 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

$$\dot{F}_{*fm} = \dot{F}_{*rdm} - \dot{F}_{*adm} - \dot{F}_{*qdm} = 1,2 + 1,04 + 0,064 = 2,3.$$

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 повній 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.

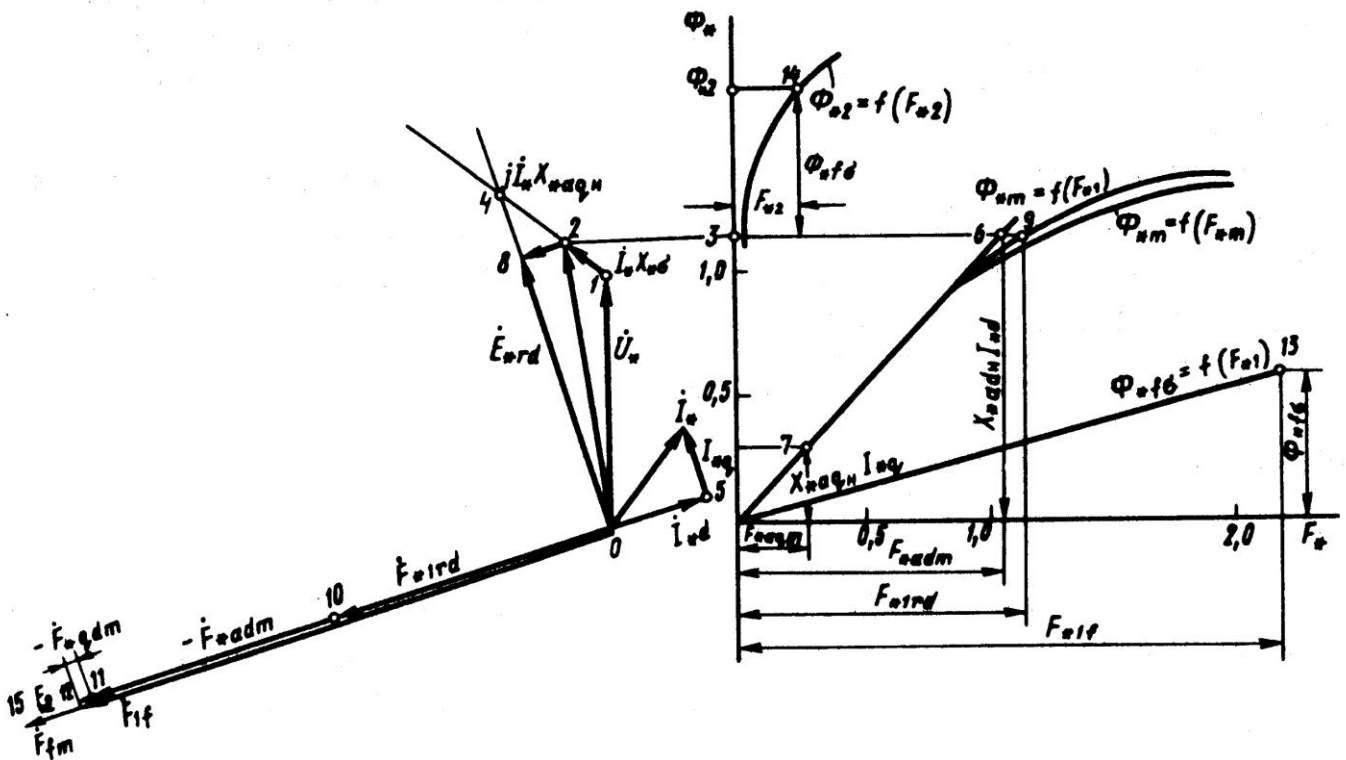


Рисунок 3.5 – Часткові характеристики намагнічування

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.

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 у масштабі $m_E = 0,2$ в.о./см, $m_F = 0,2$ в.о./см.

Індуктивний опір якоря $X_{*l} = X_{*\sigma} + X_{*a} = 0,122 + 1,44 = 1,562$. 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 – Відповідні значення струму збудження

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

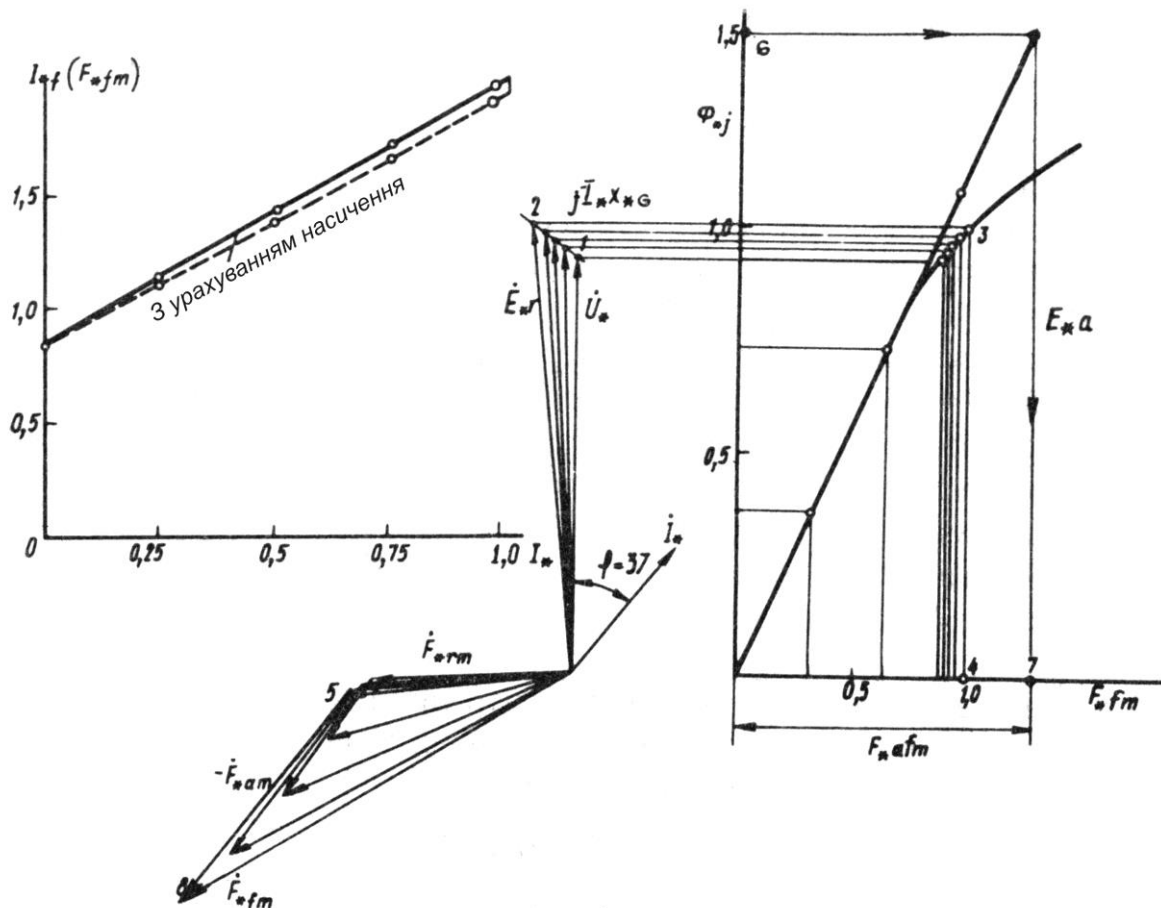


Рисунок 3.6 – Діаграма напруги та МРС

Для обліку насичення під час побудови 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 m_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 $\dot{F}_{*rm} = 1$ 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 $\dot{F}_{*afm} = 6,7 \cdot 0,2 = 1,34$.

Враховуючи, що МРС F_{*afm} збігається по фазі зі струмом I_* , а $\dot{F}_{*rm} = \dot{F}_{*fm} + \dot{F}_{*afm}$ 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 регульовальної характеристики, та зведемо їх до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані до регульовальної характеристики

$I_* \dots$	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 регульовальної характеристики, певної без обліку насичення.

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

Контрольні запитання за темою «Синхронні електричні машини»

1. У чому полягає основна особливість СМ і яка сфера їхнього застосування?
2. Будова і призначення основних частин СМ.
3. Які відмінності в будові магнітопроводу й обмоток СМ порівняно 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 становить 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. За яких умов СМ переходить у режим СД? У 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» (2 години)

Задача 4.1

Машина постійного струму в режимі двигуна має такі номінальні дані: P_H ; U_H ; I_H ; $R_{я}$; $I_{зб}$; n_H . 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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_H , кВт	11	13	15	18	16	14	12	10	12	14	16
U_H , В	220	230	240	230	220	230	240	230	220	230	240
n_H , об/хв	1 000	960	900	840	800	1 100	1 180	960	900	860	800
I_H , А	62	64	66	68	66	64	62	60	62	64	66
$R_{я}$, 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 К

Визначаємо струм якоря двигуна й генератора

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

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

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

$$E_G = U_G + I_{я,г} \cdot R_{я} = 230 + 59 \times 0,09 = 235,3 \text{ В}.$$

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 $\Delta U_{щ} = 2$ В, тоді

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

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

і швидкість обертання має бути

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

Знаходимо номінальний струм і номінальну потужність:

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

$$P_{нг} = U_{г} \cdot I_{нг} = 230 \times 56 = 12\,880 \text{ Вт} = 12,9 \text{ кВт.}$$

Задача 4.2

Визначити швидкість обертання якоря генератора з $P_H = 16,5$ кВт, $U_H = 230$ В, $n_{н.г} = 1\,460$ об/хв, $R_{я} = 0,18$ Ом, $R_{зб} = 82$ Ом при роботі двигуном з $U_{дв} = 220$ 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 – Дані до розрахунку

Параметр	Варіант завдання										
	К	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	1 460	1 400	1 540	1 500	1 460	1 400	1 540	1 600	1 500	1 460	1 400
$R_{я}$, 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 К

Знаходимо струм якоря генератора й двигуна:

$$I_{я.г} = I_H + I_{зб} = P_{нг}/U_{н.г} + U_H/R_{зб} = 16\,500 / 230 + 230 / 82 = 72 + 2,8 = 74,8 \text{ А}$$

$$I_{я.дв} = I_{я.г} \text{ (за умовою завдання).}$$

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:

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

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

Швидкість обертання якоря двигуна знаходимо із співвідношення

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

Визначаємо електромагнітну потужність двигуна:

$$P_{\text{ем}} = E_{\text{дв}} \cdot I_{\text{ядв}} = 206,5 \times 74,8 = 15\,446 \text{ Вт} = 15,5 \text{ кВт.}$$

Номінальна потужність двигуна буде трохи меншою.

Контрольні запитання за темою «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 проти-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?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 428 с.
2. Загірняк М. В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
3. Електричні машини : підручник / Б. Т. Кононов, Г. І. Лагутін, О. Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б. Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.
4. Мазуренко Л. І. Асинхронні генератори з вентильним та вентильно-ємнісним збудженням для автономних енергоустановок : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.09.01 – електричні машини і апарати / Мазуренко Леонід Іванович. – Київ, 2001. – 31 с.
5. Плахтіна О. Г. Дослідження систем стабілізації напруги асинхронного генератора з самозбудженням та вибір раціонального варіанта / О. Г. Плахтіна, Б. Л. Копчак // Вісн. Харків. держ. політехн. ун-ту. – Вип. 84. – 2000. – 164 с.
6. Півняк Г. Г. Електричні машини : навч. посіб. / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. П. Довгань. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 331 с.
7. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва ; за ред. В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2018. – 452 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – 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

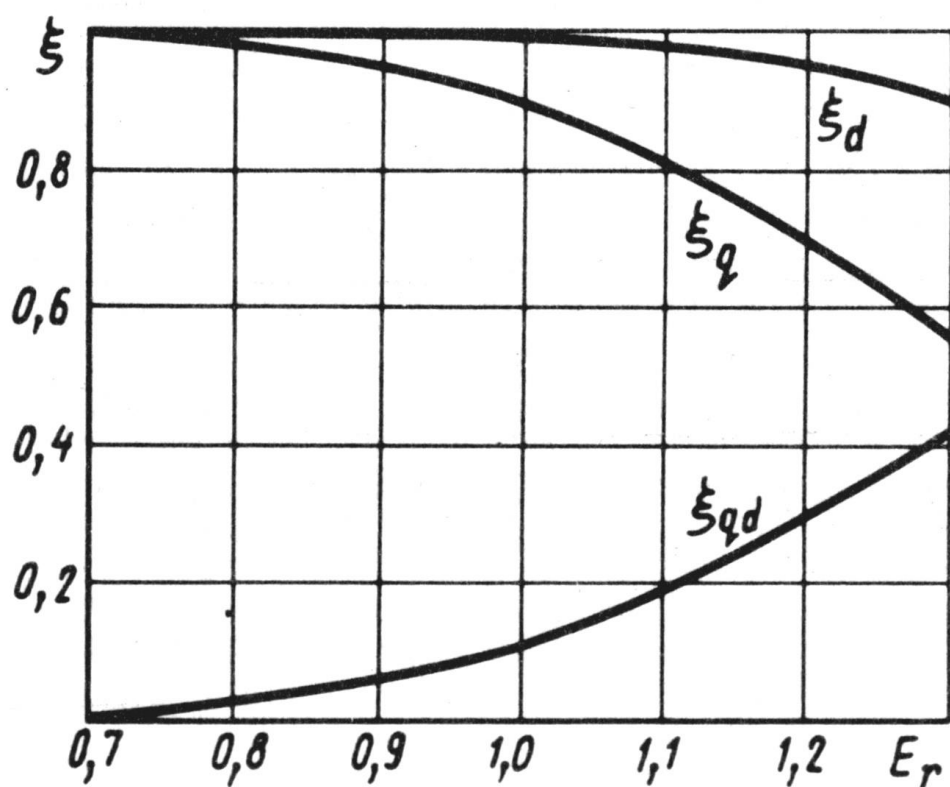


Рисунок Б.1 – Залежності ξ_d , ξ_q , ξ_{qd} від E_r

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – 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	–	–	–	–	–	–	–

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до виконання практичних робіт
із навчальної дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

за розділом

«МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *М. Л. Глєбова*

План 2024, поз. 283М

Підп. до друку 25.09.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,4.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.