

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ,  
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ**

**методичні рекомендації**

для виконання практичних робіт для здобувачів підготовки за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв  
2023

УДК 621.313

E50

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету протокол № 4 від "07" 12. 2023р.

Укладач

А. А. Ставинський – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет

Рецензенти:

Рябенський В. М. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри програмної електроніки, електротехніки та телекомунікацій Миколаївського національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

© Миколаївський національний аграрний університет, 2023

## ВСТУП

Для успішного засвоєння базової дисципліни "Електричні машини" досить важливе значення мають різноманітні практичні вправи та рішення задач, які надають можливість більш глибокого засвоєння теоретичних питань, а також сприяння отриманню навичок по розрахунку та експлуатації електричних машин і трансформаторів.

Методичні вказівки складено у відповідності з навчальною програмою курсу "Електричні машини" та згідно наступним розділам: машини постійного струму, трансформатори, асинхронні машини, синхронні машини. Перед завданнями кожного з розділів подано стисли теоретичні відомості, а також приклади рішення типових задач, які роз'яснюють ті або інші властивості електричних машин і трансформаторів. Завдання підібрано різноманітного рівня складності. Деякі з завдань запозичені з рекомендованої літератури.

Методичні вказівки призначені для практичних занять студентів спеціальності "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" МНАУ.

# 1. КОЛЕКТОРНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1. Короткі теоретичні відомості

Електричними машинами (ЕМ) називають електромеханічні пристрої з рухомими елементами будови обертового або поступально-го руху, дія яких заснована на явищі електромагнітної індукції. ЕМ призначені для перетворення механічної енергії в електричну (генератори), електричної енергії в механічну (двигуни), а також перетворення параметрів електричної енергії статичними перетворювачами (трансформаторами) та обертовими перетворювачами.

ЕМ постійного струму містять механічний або напівпровідниковий комутатор струму. Машини з механічним комутатором (колектором) використовуються в якості генераторів і двигунів. Основними перевагами колекторних машин постійного струму (КМПС) перед іншими типами машин є можливість плавного регулювання відносно простими засобами частоти обертання двигунів і напруги на затискачах генераторів у широких межах, а також досить велике значення пускового моменту у двигунів.

Напруга  $U$  на затискачах КМПС визначається рівнянням

$$U = E \pm I_a \sum R_a ,$$

де  $E$  – електрорушійна сила (ЕРС) обмотки якоря (ротора);  $I_a$  – струм якоря;  $\sum R_a$  – опір кола якоря; знак "+" відповідає режиму двигуна, "-" – режиму генератора.

Величина  $E$  залежить від значення магнітного потоку  $\Phi$ , частоти обертання якоря машини  $n$ , а також конструктивної сталої  $C_e$

$$E = C_e \Phi n ; C_e = pN / (60a) ,$$

де  $p$  – число пар полюсів;  $N$  – кількість провідників у обмотці;  $2a$  – число паралельних віток.

Електромагнітний момент КМПС визначається виразом:

$$M_{\text{ем}} = C_m \Phi I_a,$$

де  $C_m$  – коефіцієнт, який залежить від конструктивних параметрів ЕМ

$$C_m = pN / (2\pi a).$$

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = EI_a = M_{\text{ем}} \omega,$$

де  $\omega = 2\pi n / 60$  – кутова швидкість обертання.

Корисна потужність, яка віддається генератором,

$$P_2 = UI,$$

де  $I$  – струм зовнішнього кола.

Потужність, що підводиться до двигуна

$$P_1 = UI.$$

Обертний момент на валу двигуна пов'язаний з його корисною потужністю співвідношенням

$$M = P_2 / \omega = 9,55 P_2 / n.$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) КМПС визначається виразом

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P},$$

де  $\Sigma P$  – сумарні втрати машини, які складаються з електричних втрат в обмотках збудження і якоря, магнітних втрат, механічних втрат, а також додаткових втрат.

## 1.2. Приклади рішення типових задач

### Приклад 1.2.1

Генератор з незалежним збудженням у номінальному режимі віддає корисну потужність  $P_{\text{ном2}} = 32$  кВт при напрузі на затискачах  $U_{\text{ном}} = 230$  В. ККД генератора дорівнює  $\eta_{\text{ном}} = 0,87$ . Напряга збудження  $U_3 = 115$  В. Опір обмотки якоря  $R_a = 0,026$  Ом, опір обмотки збудження  $R_3 = 46$  Ом. Необхідно визначити: номінальний струм

генератора  $I_{\text{ном}}$ , струм збудження  $I_3$ , ЕРС генератора  $E$ , опір навантаження  $R_{\text{н}}$ , потужність, що споживається  $P_1$ , електричні втрати в обмотках збудження  $P_3$  та якоря  $P_a$ , сумарні втрати  $\Sigma P$ .

Рішення.

Номінальний струм генератора визначається співвідношенням

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном2}} / U_{\text{ном}} = 32000 / 230 = 139,1 \text{ А.}$$

Струм обмотки збудження

$$I_3 = U_3 / R_3 = 115 / 46 = 2,5 \text{ А.}$$

Визначається ЕРС генератора

$$E = U_{\text{ном}} + I_{\text{ном}} R_a = 230 + 139,1 \cdot 0,026 = 233,6 \text{ В.}$$

Опір навантаження визначається за відомими величинами номінальних напруги та струму

$$R_{\text{н}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}} = 230 / 139,1 = 1,65 \text{ Ом.}$$

Споживаєма потужність

$$P_1 = P_{2\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 32 / 0,87 = 36,8 \text{ кВт.}$$

Визначаємо електричні втрати в обмотках збудження та якоря:

$$P_3 = I_3^2 R_3 = 2,5^2 \cdot 46 = 287,5 \text{ Вт;}$$

$$P_a = I_a^2 R_a = 139,1^2 \cdot 0,026 = 503,1 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати потужності визначаються за співвідношенням

$$\Sigma P = P_1 - P_{\text{ном2}} = 36,8 - 32 = 4,8 \text{ кВт.}$$

### Приклад 1.2.2

Чотирьохполюсний двигун з паралельним збудженням увімкнено до мережі з номінальною напругою  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ . При цьому він споживає струм  $I = 157 \text{ А}$ . Обмотка якоря з опором  $R_a = 0,0427 \text{ Ом}$  складається з 360 провідників, які утворюють чотири паралельні вітки. Опір обмотки збудження  $R_3 = 44 \text{ Ом}$ . Магнітний потік полюса  $\Phi = 0,008 \text{ Вб}$ . Визначити: струми в обмотках збудження і якоря;

проти-ЕРС двигуна; електромагнітні момент та потужність; частоту обертання якоря.

Рішення.

Визначаються струми в обмотках збудження та якоря:

$$I_3 = U_{\text{ном}} / R_3 = 220 / 44 = 5 \text{ А};$$

$$I_a = I - I_3 = 157 - 5 = 152 \text{ А}.$$

Проти-ЕРС в обмотці якоря

$$E = U_{\text{ном}} - I_a R_a = 220 - 152 \cdot 0,0427 = 213,5 \text{ В}.$$

Електромагнітний момент

$$M_{\text{ем}} = pN\Phi N_a / (2\pi a) = 2 \cdot 360 \cdot 0,008 \cdot 152 / (2 \cdot 3,14 \cdot 2) = 69,7 \text{ Нм}.$$

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = EI_a = 213,5 \cdot 152 = 32450 \text{ Вт}.$$

Частота обертання якоря

$$n = 60aE / (pN\Phi) = 60 \cdot 2 \cdot 213,5 / (2 \cdot 360 \cdot 0,008) = 4450 \text{ об/хв}.$$

### 1.3. Завдання до контрольної роботи № 1

#### Задача 1.3.1

Генератор постійного струму з незалежним збудженням працює в номінальному режимі і віддає корисну потужність  $P_{\text{ном2}}$  при напрузі на затискачах  $U_{\text{ном}}$ , та розвиває ЕРС  $E$ . Потужність первинного двигуна, що обертає генератор, дорівнює  $P_1$ . Генератор віддає в зовнішній ланцюг струм навантаження, рівний струму якоря  $I_{\text{ном}} = I_a$ ; струм в обмотці збудження  $I_3$ . Опір навантаження дорівнює  $R_{\text{н}}$ . Опір обмотки якоря  $R_a$ , обмотки збудження  $R_3$ . Напряга на обмотці збудження  $U_3$ . ККД генератора дорівнює  $\eta_{\text{ном}}$ . Електричні втрати в обмотці якоря  $P_a$ , в обмотці збудження  $P_3$ . Сумарні втрати в генераторі дорівнюють  $\Sigma P$ . Використовуючи дані, приведені в табл. 1.1, визначити величини, що відзначені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 1.1

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{ном2}},$ кВт	-	-	230	-	-	-	-	110	19	99
$U_{\text{ном}},$ В	-	460	-	230	230	230	230	-	115	-
$E,$ В	233,6	-	243	-	233,6	-	-	-	-	-
$P_1,$ кВт	37	110	-	40	-	-	-	-	23	-
$I_{\text{ном}},$ А	139	-	-	-	139	826	1000	478	-	-
$R_{\text{н}},$ Ом	1,65	-	0,23	-	-	-	-	-	-	2,14
$R_a,$ Ом	-	0,054	-	0,07	-	0,006	0,013	-	0,13	-
$R_3,$ Ом	-	-	-	100	-	18,5	11,5	44,5	110	46
$U_3,$ В	115	230	115	-	115	230	115	230	-	230
$\eta_{\text{ном}}$	-	0,9	-	-	-	-	0,9	0,9	-	-
$P_a,$ Вт	-	-	-	-	-	-	-	1140	-	2500
$P_3,$ Вт	288	1150	1150	132	287	-	-	-	110	-
$\Sigma P,$ кВт	-	-	24	5	4,8	15	-	-	-	11
$I_3,$ А	2,5	1,15	1	2,3	1,15	-	-	-	1	-

## Задача 1.3.2

Генератор постійного струму з незалежним збудженням приводиться в обертання двигуном змінного струму потужністю  $P_1$ . Номінальна потужність генератора  $P_{\text{ном}}$ . Сумарні втрати потужності в генераторі  $\Sigma P$  при ККД  $\eta_{\text{г}}$ . Генератор розвиває електромагнітну потужність  $P_{\text{ем}}$  і віддає в навантаження струм  $I_{\text{ном}}$  при напрузі  $U_{\text{ном}}$ . Опір обмотки якоря дорівнює  $R_a$ . ЕРС генератора дорівнює  $E$ . Утрати потужності в обмотці якоря  $P_a$ . Електромагнітний гальмовий момент на валу генератора, який урівноважений обертовим моментом приводного двигуна, дорівнює  $M_{\text{ем}}$ . Частота обертання якоря дорівнює  $n_{\text{ном}}$ . Використовуючи дані генератора, приведені в таблиці 1.2, визначити усі величини, що відзначені прочерками.

## Задача 1.3.3

Генератор постійного струму з паралельним збудженням віддає корисну потужність  $P_2$  при номінальній напрузі  $U_{\text{ном}}$ . Сила струму в навантаженні дорівнює  $I_{\text{н}}$ , струм у ланцюзі якоря  $I_a$ , в обмотці



збудження  $I_3$ . Опір ланцюга якоря дорівнює  $R_a$ , обмотки збудження  $R_3$ . Генератор розвиває ЕРС  $E$ . Електромагнітна потужність дорівнює  $P_{ем}$ . Потужність, що витрачається на обертання генератора, дорівнює  $P_1$ . Сумарні втрати потужності в генераторі складають  $\Sigma P$  при ККД  $\eta_r$ . Утрати потужності в обмотках якоря та збудження відповідно дорівнюють  $P_a$  і  $P_3$ . Використовуючи номінальні дані генератора, приведені в табл. 1.3, визначити усі величини, що відзначені прочерками у таблиці варіантів.

Таблиця 1.2

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_1$ , кВт	-	-	-	-	19	-	55	-	6	-
$P_{ном}$ , кВт	16	-	-	-	-	-	50	9	-	2,7
$\Sigma P$ , кВт	-	1	-	5	3	-	-	3	-	0,7
$\eta_r$	0,84	-	0,79	0,91	-	0,75	-	-	0,83	-
$P_{эм}$ , кВт	-	5,41	-	52,4	-	-	-	9,74	-	3,07
$I_{ном}$ , А	-	-	23,4	-	69,5	78,3	-	-	21,7	-
$U_{ном}$ , В	230	-	115	-	-	115	230	-	230	-
$R_a$ , Ом	0,3	0,9	0,7	-	-	-	-	-	-	-
$E$ , В	-	-	-	241,5	251	-	-	124,4	-	131,4
$P_a$ , Вт	-	424	-	-	-	-	2496	-	-	-
$M_{эм}$ , Нм	-	43	-	385	115	95	-	-	-	20,2
$n_{ном}$ , об/хв	1450	-	1450	-	-	980	1300	980	1200	-

#### Задача 1.3.4

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням споживає з мережі потужність  $P_1$  і розвиває на валу номінальну потужність  $P_{ном2}$  при напрузі  $U_{ном}$  і струмі  $I_{ном}$ . Струм в обмотці якоря  $I_a$ , в обмотці збудження  $I_3$ . Номінальний обертаючий момент двигуна  $M_{ном}$  при частоті обертання якоря  $n_{ном}$ . У якорі наводиться проти-ЕРС  $E$ . Опір обмотки якоря  $R_a$ , обмотки збудження  $R_3$ . Сумарні втрати потужності в двигуні  $\Sigma P$ . ККД двигуна дорівнює  $\eta_{дв}$ . Використовуючи дані двигуна, приведені в табл. 1.4, визначити усі величини, що відзначені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 1.3

Величини	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_2, \text{кВт}$	-	20,65	2	11,8	-	-	-	-	-	21,56
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	220	-	-	-	220	115	430	-	-	220
$I_{\text{н}}, \text{А}$	98	48	-	102,6	-	-	-	17,4	-	-
$I_3, \text{А}$	-	-	2,9	-	-	-	-	-	2	-
$I_a, \text{А}$	-	-	-	-	100	-	50	20,3	-	-
$R_a, \text{Ом}$	0,15	0,2	-	-	-	0,07	-	0,25	-	-
$R_3, \text{Ом}$	110	-	-	-	110	18,9	215	-	-	-
$E, \text{В}$	-	440	120	-	235	122,6	-	-	-	-
$P_{\text{ем}}, \text{кВт}$	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-
$P_1, \text{кВт}$	-	-	2,55	14	25,36	-	-	-	23,45	-
$\Sigma P, \text{кВт}$	-	2,8	-	-	-	2,2	-	0,55	2,8	-
$\eta_{\Gamma}$	0,85	-	-	-	-	-	0,88	0,78	-	0,85
$P_a, \text{Вт}$	-	-	-	825	-	-	-	-	500	1500
$P_3, \text{Вт}$	-	-	-	690	-	-	-	-	860	440

Таблиця 1.4

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_1, \text{кВт}$	22	-	3,8	-	-	-	3,9	39,8	-	-
$P_{\text{ном2}}, \text{кВт}$	-	-	3,2	20	-	18	-	35	20	-
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	-	-	110	-	110	440	-	-	220	-
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	50	-	-	100	36,4	-	-	90,5	-	34,5
$I_a, \text{А}$	-	86,5	-	-	35,4	-	35,4	-	-	-
$I_3, \text{А}$	-	4	-	10	-	5,5	1	-	-	1
$M_{\text{ном}}, \text{Нм}$	-	231	-	-	19,1	180	-	-	119	30,6
$n_{\text{ном}}, \text{об/хв}$	955	-	1000	1600	-	-	1600	1450	-	-
$E, \text{В}$	-	-	-	210	100	437,8	-	432	-	103,1
$R_a, \text{Ом}$	0,05	0,093	0,2	-	-	-	0,282	-	0,111	-
$P_3, \text{Вт}$	80	110	110	-	-	-	-	110	22	-
$\Sigma P, \text{кВт}$	4	-	-	2	-	-	0,7	-	-	0,6
$\eta_{\text{дв}}$	-	0,88	-	-	0,82	0,82	-	-	0,91	0,843

### Задача 1.3.5

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням, працюючи в номінальному режимі, віддає корисну потужність на валу  $P_{\text{ном2}}$ , розвиваючи при цьому номінальний момент  $M_{\text{ном}}$  при частоті обертання  $n_{\text{ном}}$ . Двигун споживає з мережі номінальний струм  $I_{\text{ном}}$  при напрузі  $U_{\text{ном}}$ . Струм в обмотці якоря  $I_a$ , в обмотці збудження  $I_z$ . Споживана з мережі потужність дорівнює  $P_1$ . Сумарні втрати потужності в двигуні складають  $\Sigma P$ , його ККД складає  $\eta_{\text{дв}}$ . Використовуючи номінальні дані двигуна, приведені в табл. 1.5, визначити усі величини, що відзначені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 1.5

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_{\text{ном2}}$ , кВт	22	-	11	30	12	-	-	-	30	3,6
$M_{\text{ном}}$ , Н·м	-	28,65	-	191	-	213	200	78,4	-	-
$n_{\text{ном}}$ , об/хв	985	-	1340	-	750	-	1433	-	1433	1200
$I_{\text{ном}}$ , А	113,6	-	-	79,5	-	-	159	56,8	-	18,8
$U_{\text{ном}}$ , В	-	22	220	-	220	220	-	-	220	-
$I_a$ , А	-	18	-	-	-	108	-	55,7	150	-
$I_z$ , А	5,6	-	1,1	2,5	1,5	-	9	-	-	0,8
$P_1$ , кВт	25	4,14	12,5	35	-	-	34,9	-	-	-
$\Sigma P$ , кВт	-	-	-	-	-	3	-	1,5	4,9	0,54
$\eta_{\text{дв}}$	-	0,87	-	-	0,8	0,88	-	0,88	-	-

### Задача 1.3.6

Генератор постійного струму зі змішаним збудженням працюючи в номінальному режимі, віддає корисну потужність  $P_{\text{ном2}}$  при напрузі  $U_{\text{ном}}$  і струмі навантаження  $I_{\text{ном}}$ . Паралельна обмотка включена на повну напругу генератора. Струм у ланцюзі якоря  $I_a$ , у паралельній обмотці збудження  $I_z$ . ЕРС генератора дорівнює  $E$ . Опір навантаження  $R_H$ ; опір обмотки якоря дорівнює  $R_a$ ; опором послідовної обмотки

знехтувати. Опір паралельної обмотки збудження  $R_3$ . ККД генератора дорівнює  $\eta_r$ . Генератор приводиться в обертання первинним двигуном потужністю  $P_{дв}$ . Використовуючи номінальні дані генератора, приведені в табл. 1.6, визначити всі невідомі величини, що відмічені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 1.6

Величини	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_{2ном},$ кВт	10	-	-	2,2	-	8,7	4	-	-	-
$U_{ном},$ В	-	220	110	-	-	-	220	-	220	110
$I_{ном},$ А	-	18,2	-	-	11	39,5	-	43,4	-	20
$I_a,$ А	48	-	12	22	-	41,5	-	-	-	-
$I_3,$ А	4,6	-	1	2	-	-	5	-	2	-
$E,$ В	-	230,4	-	-	118,4	226,2	-	230	-	115
$R_{н},$ Ом	-	-	-	-	10	-	-	5,07	-	-
$R_a,$ Ом	0,21	-	0,7	0,23	-	-	0,45	-	0,15	-
$R_3,$ Ом	-	44	-	-	110	-	-	47,8	-	55
$\eta_r$	-	0,8	0,85	-	-	0,87	-	0,83	0,87	0,85
$P_{дв},$ Вт	12	-	-	2,6	1,42	-	5	-	10	-

### Задача 1.3.7

Електродвигун постійного струму з послідовним збудженням віддає корисну потужність  $P_2$  і споживає з мережі потужність  $P_1$  при напрузі  $U_{ном}$ . Двигун розвиває корисний момент  $M$  при частоті обертання якоря  $n$ . Сила струму в ланцюзі якоря дорівнює  $I$ , проти-ЕРС в обмотці якоря  $E$ . Утрати потужності в обмотках якоря і збудження дорівнюють  $P_a$ . Опір обмоток якоря і збудження  $R_a + R_{пс}$ . У момент пуску двигун споживає з мережі пусковий струм  $I_{п}$ . ККД двигуна дорівнює  $\eta_{дв}$ . Використовуючи дані, приведені в табл. 1.7, визначити усі величини, що відзначені прочерками в таблиці варіантів.

### Задача 1.3.8

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням, працюючи в номінальному режимі, віддає корисну потужність на валу  $P_{\text{ном2}}$  при напрузі  $U_{\text{ном}}$ . Частота обертання двигуна  $n_{\text{ном}}$ . Опір обмотки якоря  $R_a$ , обмотки збудження  $R_z$ , додаткових полюсів  $R_d$ . ККД двигуна дорівнює  $\eta_{\text{дв}}$ . Використовуючи дані, приведені в табл. 1.8, визначити наступні величини: 1) струм в обмотці якоря  $I_a$ ; 2) пусковий струм виходячи зі співвідношення пускового та номінального струму за умовами комутації  $I_{\text{п}} = 2,5I_{\text{аном}}$ ; 3) опір пускового реостату, необхідно-го для забезпечення співвідношення  $I_{\text{п}} = 2,5I_{\text{аном}}$ ; 4) частоту змінного струму в обмотці якоря.

Таблиця 1.7

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_2$ , кВт	44	-	-	21	-	-	-	-	5	10
$P_1$ , кВт	51,3	-	4,5	-	10	-	11	-	6,7	-
$U_{\text{ном}}$ , В	-	110	-	250	-	220	110	440	440	-
$M$ , Н·м	296	35	20	310	48	-	79,5	880	-	-
$n_{\text{ном}}$ , об/хв	-	-	1800	-	1600	1200	-	510	1030	1200
$I$ , А	205	39	-	-	45,5	33	-	-	-	100
$E$ , В	-	-	-	-	208	-	-	-	417	-
$P_a$ , Вт	2270	300	-	-	-	-	800	-	-	-
$R_a + R_{\text{пс}}$ , Ом	-	-	0,55	0,13	-	0,74	-	0,054	-	0,08
$I_{\text{п}}$ , А	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-
$\eta_{\text{дв}}$	-	0,85	-	0,84	-	0,75	0,91	0,78	-	0,905

### Задача 1.3.9

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням споживає струм  $I$  при напрузі  $U_{\text{ном}}$ . Опір обмотки якоря  $R_a$ , обмотки збудження  $R_z$ . Магнітний потік полюса дорівнює  $\Phi$ . На якорі покладено  $N$  провідників, що утворюють  $a$  пар паралельних віток. Число пар полюсів двигуна дорівнює  $p$ . Використовуючи дані, приведені в табл.

1.9, визначити наступні величини: 1) струми в обмотках якоря  $I_a$  і збудження  $I_z$ ; 2) ЕРС в обмотці якоря  $E$ ; 3) частоту обертання  $n$ ; 4) електромагнітний момент  $M_{ем}$ ; 5) електромагнітну потужність  $P_{ем}$ .

Таблиця 1.8

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_{ном2},$ кВт	0,55	0,55	0,71	1	2,5	2,5	4,5	4,5	13	13
$U_{ном},$ В	110	220	220	220	110	220	220	440	220	440
$n_{ном},$ об/хв	3000	3000	2360	3000	2120	2200	3150	3150	2120	2360
$\eta_{дв}$	0,71	0,71	0,7	0,73	0,76	0,77	0,82	0,82	0,86	0,87
$R_a,$ Ом	1	3,99	3,99	2,52	0,196	0,788	0,185	0,74	0,081	0,279
$R_z,$ Ом	810	222	123	92	156	39,4	202	54,5	61,5	61,5
$R_d,$ Ом	0,58	2,55	2,55	1,47	1,134	0,682	0,148	0,486	0,056	0,175

Таблиця 1.9

Варіанти	$U_{ном},$ В	$I,$ А	$R_a,$ Ом	$R_z,$ Ом	$\Phi,$ Вб	$N$	$p$	$a$
21	220	53,15	0,182	191	0,0095	496	2	2
22	220	24,1	0,643	298	0,006	812	3	3
23	220	35,6	0,303	298	0,006	522	2	2
24	220	14,6	1,48	372	0,0048	1218	4	2
25	220	35,7	0,376	250	0,0071	744	2	2

### Задача 1.3.10

Електродвигун постійного струму з послідовним збудженням розвиває на валу корисну номінальну потужність  $P_{ном}$ , споживаючи номінальний струм  $I_{ном}$  при напрузі  $U_{ном}$ . Якір двигуна обертається з номінальною частотою  $n_{ном}$ . Опір обмотки якоря і послідовної обмотки збудження дорівнює  $R_a + R_{пс}$ . Користуючись даними, приведеними в табл. 11 варіантів, визначити: 1) потужність  $P_1$ , що споживається з мережі; 2) ККД  $\eta_{ном}$  3) пусковий струм  $I_{п}$  4) опір пускового реостата  $R_p$  для обмеження пускового струму до подвійного номінального; 5) номінальний обертаючий момент  $M_{ном}$ .

Таблиця 1.10

Варіанти	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$U_{\text{ном}}$ , В	$I_{\text{ном}}$ , А	$n_{\text{ном}}$ , об/хв	$R_a + R_{\text{пс}}$ , Ом
26	8	220	46	1200	0,51
27	17	220	92	1000	0,19
28	23	220	124	970	0,13
29	5,5	220	33	1200	0,82
30	12	220	67	1160	0,3

#### 1.4. Завдання для самостійної роботи

##### Задача 1.4.1

При частоті обертання якоря  $n = 1500$  об/хв ЕРС КМПС дорівнює 115 В. Визначити величину і частоту ЕРС обмотки якоря при частотах обертання 1000, 750, 600 об/хв. Кількість пар полюсів машини  $p = 2$ . (Відповідь:  $E = 76,8, 57,5, 46$  В;  $f = 16,7, 12,5, 10$  Гц)

##### Задача 1.4.2

Перетин міді паралельної обмотки збудження КМПС з чотирма полюсами дорівнює  $0,3 \text{ мм}^2$ , кількість витків на полюс 860, довжина напіввитка обмотки 28 см. Визначити опір обмотки збудження при робочій температурі  $75^\circ\text{C}$ . (Відповідь:  $R_z = 137,4$  Ом)

##### Задача 1.4.3

Магнітний потік зазору на полюс генератора постійного струму  $\Phi_\delta = 0,0129$  Вб, постійний коефіцієнт моменту  $C_m = 126$ . Визначити напругу машини при номінальному струмі 100 А, якщо частота обертання якоря  $n = 1500$  об/хв, опір кола якоря  $R_a = 0,25$  Ом. (Відповідь:  $U = 230$  В)

#### Задача 1.4.4

Генератор постійного струму з паралельним збудженням має наступні данні: номінальну потужність  $P_{\text{ном}} = 10$  кВт, номінальну напругу  $U_{\text{ном}} = 230$  В, опір кола якоря  $R_a = 0,3$  Ом, опір кола збудження  $R_z = 150$  Ом. Визначити ККД генератора, якщо сума механічних, магнітних і додаткових втрат складає 6% від номінальної потужності. (Відповідь:  $\eta = 0,865$ )

#### Задача 1.4.5

Визначити обертовий момент первинного двигуна, суму втрат і ККД генератора постійного струму, якщо генератор віддає потужність 100 кВт, потужність первинного двигуна 114 кВт, частота обертання  $n = 975$  об/хв. Визначити також струм генератора, якщо напруга  $U = 115$  В. (Відповідь:  $M_{\text{дв}} = 1117$  Н·м,  $\Sigma P = 14$  кВт,  $\eta = 0,877$ ,  $I = 869,5$  А)

#### Задача 1.4.6

Визначити електричні втрати в колі якоря, суму механічних, магнітних і додаткових втрат двигуна постійного струму паралельного збудження, якщо обертовий момент двигуна  $M = 38,5$  Н·м, напруга  $U = 220$  В, струм збудження  $I_z = 1,3$  А, ККД  $\eta = 82,5\%$ , частота обертання  $n = 1500$  об/хв, опір кола якоря  $R_a = 0,58$  Ом. (Відповідь:  $P_a = 593,9$  Вт;  $P_{\text{тр}} + P_{\text{м}} + P_{\text{д}} = 402,3$  Вт)

#### Задача 1.4.7

Визначити кратність пускового струму двигуна постійного струму з номінальною потужністю  $P_{\text{ном}} = 4,5$  кВт при безпосередньому вмиканні до мережі з напругою 220 В. Опір кола якоря  $R_a = 0,25$  Ом, ККД двигуна  $\eta = 85\%$ . Визначити також опір пускового реостату при умові зниження початкового пускового струму до потрібного номінального. (Відповідь  $k_I = 36,7$ ;  $R_{\text{п}} = 2,8$  Ом)



#### Задача 1.4.8

Двигун постійного струму з паралельним збудженням має наступні номінальні данні: потужність  $P_{\text{ном}} = 12$  кВт, напругу  $U_{\text{ном}} = 220$  В, частоту обертання  $n_{\text{ном}} = 685$  об/хв, номінальний струм  $I = 64$  А, струм збудження  $I_z = 1,75$  А. Опір обмотки якоря у нагрітому стані  $R_a = 0,281$  Ом. Визначити частоту обертання двигуна при неробочому руху, а також при гальмовому моменті на валу, який дорівнює  $0,6M_{\text{ном}}$ . Реакцією якоря можна знехтувати. Побудувати механічну характеристику двигуна. (Відповідь:  $n_0 = 744$  об/хв;  $n_1 = 708,6$  об/хв.)

#### Задача 1.4.9

Двигун постійного струму з послідовним збудженням має наступні номінальні данні: потужність  $P_{\text{ном}} = 45$  кВт, напругу  $U_{\text{ном}} = 220$  В, частоту обертання  $n_{\text{ном}} = 880$  об/хв, к.к.д.  $\eta_{\text{ном}} = 73\%$ . Побудувати криву залежності струму якоря від обертового моменту двигуна.

#### Задача 1.4.10

Скласти таблицю кроків та накреслити схему простої петльової обмотки якоря чотирьохполюсної КМПС за наступними даними: кількість елементарних пазів  $Z_e = 16$ ; кількість пазів якоря  $Z = 8$ .

#### Задача 1.4.11

Скласти таблицю кроків та накреслити схему простої хвильової обмотки якоря чотирьохполюсної КМПС за наступними даними: кількість елементарних пазів  $Z_e = 15$ ; кількість пазів якоря  $Z = 15$ .

## 2. ТРАНСФОРМАТОРИ

### 2.1 Короткі теоретичні відомості

Трансформаторами називають статичні електромагнітні апарати змінного струму, які призначені для перетворення параметрів електричної енергії (напруги, струму) на основі явища електромагнітної індукції. Електрична енергія підводиться до первинної обмотки від електростанції, або підстанції (мережі) та відводиться до навантаження від вторинної обмотки. За допомогою трансформаторів можливо також ступінчате та плавне регулювання напруги без зміни частоти і кількості фаз, а також перетворення частоти та кількості фаз.

ЕРС взаємної індукції, які індукуються в обмотках головним магнітним полем визначаються наступними виразами:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де  $W_{1(2)}$  – відповідно числа витків первинної і вторинної обмоток;  $\Phi$  – миттєве значення магнітного потоку.

Діючи значення ЕРС можна розрахувати за формулами:

$$E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m,$$

де  $f$  – частота струму мережі;  $\Phi_m$  – амплітудне значення магнітного потоку.

Відношення ЕРС обмоток, яке дорівнює відношенню чисел витків обмоток називається коефіцієнтом трансформації

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}.$$

В режимі неробочого руху, якщо знехтувати струмом неробочого руху (СНР) можна враховувати

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

ККД трансформатора визначається відношенням активних потужностей на вході  $P_1$  і виході  $P_2$  трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P},$$

де  $\Sigma P$  – сумарні втрати, які складаються з електричних втрат в первинної та вторинної обмотках, магнітних втрат у осерді (магнітопроводі), а також додаткових втрат у вказаних та конструкційних елементах від полів розсіяння.

Величина ККД залежить від навантаження

$$\eta = \frac{k_H S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{k_H S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_x + k_H^2 P_k},$$

де  $k_H = P_2 / P_{2\text{НОМ}}$  – коефіцієнт навантаження;  $S_{\text{НОМ}} = U_{1(2)\text{НОМ}} I_{1(2)\text{НОМ}}$  – номінальна повна потужність трансформатора;  $\cos \varphi_2$  – коефіцієнт потужності вторинного кола трансформатора;  $P_x$  – втрати неробочого ходу, які визначаються за допомогою досліду неробочого руху та характеризують, у головному, магнітні втрати;  $P_k$  – втрати короткого замикання, які визначаються з досліду короткого замикання та характеризують, у головному, електричні втрати в обмотках.

## 2.2. Приклади рішення типових задач

### Приклад 2.2.1

Номінальні напруги однофазного трансформатора  $U_{\text{НОМ}1} = 380 \text{ В}$ ,  $U_{\text{НОМ}2} = 24 \text{ В}$ . Номінальна потужність  $S_{\text{НОМ}} = 500 \text{ В}\cdot\text{А}$ . До трансформатора підключені 10 ламп накаливання потужністю 40 Вт кожна. Амплітудне значення магнітного потоку  $\Phi_m = 0,005 \text{ Вб}$ . Частота струму мережі  $f = 50 \text{ Гц}$ . Втратами в трансформаторі можна знехтувати. Необхідно визначити: номінальні струми в обмотках; коефіцієнт наван-

таження трансформатора; струми в обмотках відповідно до навантаження, що існує; числа витків обмоток; коефіцієнт трансформації.

Рішення.

Номинальні струми в обмотках:

$$I_{\text{НОМ1}} = S_{\text{НОМ}} / U_{\text{НОМ1}} = 500 / 380 = 1,32 \text{ А};$$

$$I_{\text{НОМ2}} = S_{\text{НОМ}} / U_{\text{НОМ2}} = 500 / 24 = 20,8 \text{ А}.$$

Визначається коефіцієнт навантаження

$$k_{\text{Н}} = P_2 / (S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2) = 10 \cdot 40 / (500 \cdot 1,0) = 0,8.$$

Струми в обмотках при дійсному навантаженні

$$I_1 = k_{\text{Н}} I_{\text{НОМ1}} = 0,8 \cdot 1,32 = 1,06 \text{ А}; \quad I_2 = k_{\text{Н}} I_{\text{НОМ2}} = 0,8 \cdot 20,8 = 16,6 \text{ А}.$$

При неробочому руху можна враховувати  $E_1 \approx U_{\text{НОМ1}}$ ;  $E_2 = U_{\text{НОМ2}}$ . Числа витків обмоток знаходимо за допомогою виразу  $E_{1(2)} = 4,44 f W_{1(2)} \Phi_m$ :

$$W_1 = U_{\text{НОМ1}} / (4,44 f \Phi_m) = 380 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,005) = 340;$$

$$W_2 = U_{\text{НОМ2}} / (4,44 f \Phi_m) = 24 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,005) = 22.$$

Коефіцієнт трансформації

$$K = W_1 / W_2 = 340 / 22 = 15,5.$$

### Приклад 2.2.2

Трифазний трансформатор стрижневої конструкції має наступні номінальні данні:  $S_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{\text{НОМ1}} = 10 \text{ кВ}$ ,  $U_{\text{НОМ2}} = 400 \text{ В}$ . Втрати в сталі  $P_{\text{ст}} = 2,45 \text{ кВт}$ , електричні втрати в обмотках  $P_o = 12,2 \text{ кВт}$ . Схема з'єднання обмоток трикутник / зірка. Площа перетину магнітопровода  $450 \text{ см}^2$ , амплітуда магнітної індукції в ньому  $B_m = 1,5 \text{ Тл}$ . Частота струму мережі  $f = 50 \text{ Гц}$ . Також відома витрачаєма потужність  $P_2 = 810 \text{ кВт}$  при коефіцієнті потужності  $\cos \varphi_2 = 0,9$ . Необхідно визначити: номінальні струми в обмотках і струми при фактичному на-

вантаженні; числа витків обмоток; ККД трансформатора при номінальному і фактичному навантаженні.

Рішення.

Визначаються номінальні струми в обмотках

$$I_{\text{НОМ1}} = S_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3}U_{\text{НОМ1}}) = 1000 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3) = 58 \text{ А};$$

$$I_{\text{НОМ2}} = S_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3}U_{\text{НОМ2}}) = 1000 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 1445 \text{ А}.$$

Коефіцієнт навантаження трансформатора

$$k_{\text{Н}} = P_2 / (S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2) = 810 / (1000 \cdot 0,9) = 0,9.$$

Струми в обмотках при фактичному навантаженні

$$I_1 = k_{\text{Н}} I_{\text{НОМ1}} = 0,9 \cdot 58 = 52 \text{ А}; \quad I_2 = k_{\text{Н}} I_{\text{НОМ2}} = 0,9 \cdot 1445 = 1300 \text{ А}.$$

З врахуванням схеми з'єднання визначаються фазні ЕРС, які наводяться в обмотках в режимі неробочого руху

$$E_{1\phi} \approx U_{\text{НОМ1}} = 10000 \text{ В}; \quad E_{2\phi} = U_{\text{НОМ2}} / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ В}.$$

Амплітудне значення магнітного потоку

$$\Phi_m = B_m \Pi_c = 1,5 \cdot 0,045 = 0,0675 \text{ Вб}.$$

Числа витків обмоток:

$$W_1 = U_{\text{НОМ1}} / (4,44 f \Phi_m) = 10 \cdot 10^3 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,0675) = 667;$$

$$W_2 = W_1 E_{2\phi} / E_{1\phi} = 667 \cdot 230 / 10000 = 15.$$

ККД трансформатора при номінальному навантаженні

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_{\text{СТ}} + P_{\text{О}}} = \frac{1000 \cdot 0,9}{1000 \cdot 0,9 + 2,45 + 12,2} = 0,984.$$

ККД трансформатора при фактичному навантаженні

$$\eta = \frac{k_{\text{Н}} S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{k_{\text{Н}} S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_{\text{СТ}} + k_{\text{Н}}^2 P_{\text{О}}} = \frac{0,9 \cdot 1000 \cdot 0,9}{0,9 \cdot 1000 \cdot 0,9 + 2,45 + 0,9^2 \cdot 12,2} = 0,985.$$

### 2.3. Завдання до контрольної роботи № 2

#### Задача 2.3.1

Для живлення пониженою напругою ланцюгів керування електродвигунами в цеху встановлено однофазний двохобмотковий трансформатор номінальною потужністю  $S_{\text{ном}}$ . Номінальні напруги обмоток  $U_{\text{ном1}}$  і  $U_{\text{ном2}}$ ; номінальні струми в обмотках  $I_{\text{ном1}}$  і  $I_{\text{ном2}}$ . Коефіцієнт трансформації дорівнює  $K$ . Числа витків обмоток  $W_1$  і  $W_2$ . Магнітний потік у магнітопроводі  $\Phi_m$ . Частота струму в мережі  $f = 50$  Гц. Трансформатор працює з номінальним навантаженням. Втратами в трансформаторі можна зневажити. Використовуючи дані трансформатора, зазначені в табл. 2.1, визначити усі невідомі величини, що відзначені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 2.1

Варіанти	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	$U_{\text{ном1}}$ , кВ	$U_{\text{ном2}}$ , кВ	$I_{\text{ном1}}$ , А	$I_{\text{ном2}}$ , А	$w_1$	$w_2$	$K$	$\Phi_m$ , Вб
1	-	380	-	1,43	-	-	-	15,8	0,005
2	-	220	24	-	33,4	198	-	-	-
3	1600	-	12	-	-	770	-	31,6	-
4	-	127	-	4,72	25	-	108	-	-
5	3200	380	36	-	-	-	-	-	0,025
6	-	220	24	3,64	-	-	-	-	0,005
7	500	-	-	1,0	-	750	54	-	-
8	-	220	-	-	20,8	400	22	-	-
9	250	500	-	-	-	3000	-	20,8	0,0015
10	-	-	12	3,2	-	-	-	41,6	-
11	400	-	12	-	-	-	-	18,3	0,02
12	-	-	36	1,0	-	-	-	13,9	0,003
13	-	380	-	4,2	-	4970	24,4	-	0,002
14	600	220	-	-	-	573	-	6,12	-
15	-	-	24	-	25	-	-	-	0,001

### Задача 2.3.2

Для освітлення робочих місць з метою безпеки застосували лампи накалювання зниженої напруги (12, 24, 36 В). Для їхнього живлення установили однофазний понижуючий трансформатор номінальною потужністю  $S_{\text{ном}}$ , працюючий з коефіцієнтом навантаження  $k_{\text{н}}$ . Номінальні напруги обмоток  $U_{\text{ном1}}$  і  $U_{\text{ном2}}$ ; робочі струми в обмотках  $I_1$  і  $I_2$ . Коефіцієнт трансформації дорівнює  $K$ . До трансформатора приєднали лампи накалювання потужністю  $P_{\text{л}}$  кожна в кількості  $n_{\text{л}}$ . Коефіцієнт потужності ламп  $\cos\varphi_2 = 1,0$ . Втратами в трансформаторі можна знехтувати. Використовуючи дані для свого варіанта, зазначені в табл. 2.2, визначити усі невідомі величини, що відзначені прочерками в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Варіанти	$S_{\text{ном}}$ , В·А	$k_{\text{н}}$	$U_{\text{ном1}}$ , В	$U_{\text{ном2}}$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$K$	$P_{\text{л}}$ , Вт	$n_{\text{л}}$ , шт.
16	250	-	-	12	-	-	31,7	25	8
17	-	0,75	500	-	0,75	15,6	-	-	15
18	-	0,9	-	24	1,63	15	-	60	-
19	400	0,8	220	24	-	-	-	40	-
20	250	-	-	-	0,91	16,7	-	100	2
21	-	0,8	127	-	3,15	-	10,6	-	10
22	-	0,9	-	12	-	7,5	10,6	15	-
23	400	-	500	36	0,6	-	-	-	5
24	500	-	127	12	-	33,3	-	40	-
25	-	0,8	380	-	-	18,7	-	40	5
26	500	-	-	36	1,12	-	10,6	25	-
27	-	0,8	220	-	-	-	18,35	100	2
28	-	1,0	-	36	0,8	11,1	-	-	4
29	100	-	127	-	0,71	-	10,6	-	6
30	400	-	500	36	-	-	-	100	4

### Задача 2.3.3

До трифазного трансформатора з номінальною потужністю  $S_{\text{ном}}$  і номінальними напругами первинної  $U_{\text{ном1}}$  і вторинної  $U_{\text{ном2}}$  обмоток приєднане активне навантаження  $P_2$  при коефіцієнті потужності  $\cos\varphi_2$ . Визначити: 1) номінальні струми в обмотках  $I_{\text{ном1}}$  і  $I_{\text{ном2}}$ ; 2) коефіцієнт навантаження трансформатора  $k_{\text{н}}$ ; 3) струми в обмотках  $I_1$  і  $I_2$  при фактичному навантаженні; 4) сумарні втрати потужності  $\Sigma P$  при номінальному навантаженні; 5) ККД трансформатора при фактичному навантаженні. Дані для свого варіанта взяти з табл. 2.3. Відсутні величини взяти з табл. 2.4.

### Задача 2.3.4

Інструментальний цех заводу одержує живлення від підстанції при напрузі  $U_{\text{ном2}}$ . Активна потужність, що витрачається цехом, дорівнює  $P_2$  при коефіцієнті потужності  $\cos\varphi_2$ . Визначити необхідну потужність трансформаторів на підстанції і вибрати їхній тип, користуючись табл. 2.4. На підстанції можна установити не більш двох трансформаторів однакової потужності з коефіцієнтом навантаження 0,9 – 1,0; тому в задачі потрібно вичислити коефіцієнт навантаження трансформаторів. Дані для свого варіанта взяти з табл. 2.5.

Таблиця 2.3

Варіанти	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	$U_{\text{ном1}}$ , кВ	$U_{\text{ном2}}$ , кВ	$P_2$ , кВт	$\cos\varphi_2$	Варіанти	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	$U_{\text{ном1}}$ , кВ	$U_{\text{ном2}}$ , кВ	$P_2$ , кВт	$\cos\varphi_2$
1	1000	10	0,69	850	0,95	6	630	10	0,69	554	0,88
2	160	6	0,4	150	1,0	7	40	6	0,23	35	1,0
3	100	6	0,23	80	0,9	8	1600	10	0,4	1400	0,93
4	250	10	0,4	200	0,85	9	63	10	0,23	56	1,0
5	400	10	0,4	350	0,92	10	630	10	0,4	520	0,9



Таблиця 2.4

## Технічні дані трансформаторів

Тип трансформатора	$S_{\text{НОМ}}$ , кВ·А	Напруга обмоток, кВ		Втрати потужності, кВт		$U_{\text{кв}}$ , %	$I_{\text{к1}}$ , %
		$U_{\text{НОМ1}}$	$U_{\text{НОМ2}}$	$P_{\text{СТ}}$	$P_{\text{О.НОМ}}$		
ТМ-25/6; 10	25		0,23; 0,4	0,13	0,69	4,7	3,2
ТМ-40/6; 10	40		0,23; 0,4	0,175	1,0	4,7	3,0
ТМ-63/6; 10	63		0,23; 0,4	0,24	1,47	4,7	2,8
ТМ-100/6; 10	100		0,23; 0,4	0,33	2,27	6,8	2,6
ТМ-160/6; 10	160	6, 10	0,23; 0,4; 0,69	0,51	3,1	4,7	2,4
ТМ-250/6; 10	250		0,23; 0,4; 0,69	0,74	4,2	4,7	2,3
ТМ-400/6; 10	400		0,23; 0,4; 0,69	0,95	5,5	4,5	2,1
ТМ-630/6; 10	630		0,23; 0,4; 0,69	1,31	7,6	5,5	2,0
ТМ-1000/6; 10	1000		0,23; 0,4; 0,69	2,45	12,2	5,5	2,8
ТМ-1600/6; 10	1600		0,23; 0,4; 0,69	3,3	18,0	5,5	2,6
ТМ-2500/10	2500	10	0,4; 0,69; 10,5	4,3	24,0	5,5	1,0

Таблиця 2.5

Варіанти	$P_2$ , кВт	$\cos\varphi_2$	$U_{\text{НОМ2}}$ , кВ	Варіанти	$P_2$ , кВт	$\cos\varphi_2$	$U_{\text{НОМ2}}$ , кВ
11	600	0,8	380	16	140	0,95	220
12	1350	0,75	660	17	500	0,88	380
13	200	0,85	220	18	1200	0,76	660
14	420	0,9	380	19	350	0,92	220
15	800	0,82	660	20	210	0,87	380

## Задача 2.3.5.

У складальному цеху машинобудівного заводу встановлені трифазні електродвигуни трьох типів, для кожного типу задана: номінальна (корисна) потужність  $P_{\text{НОМ}}$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$  і коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{НОМ}}$  та кількість двигунів  $n$ . Номінальна напруга

мережі 380 В. Усі двигуни працюють у номінальному режимі. Визначити необхідну потужність трансформатора для живлення електродвигунів і вибрати його тип по табл. 2.4; можуть бути встановлені два трансформатори однакової потужності, що працюють паралельно. Визначити, з яким коефіцієнтом навантаження будуть працювати трансформатори і обчислити первинний і вторинний струми і ККД трансформатора при цьому коефіцієнті навантаження. Додаткові відомості про трансформатор взяти з табл. 2.4. Дані для свого варіанта взяти з табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Величини	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_{\text{НОМ1}}$ , кВт	11	7,5	22	5,5	15	18,5	37	4	30	45
$\cos\varphi_{\text{НОМ1}}$	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
$\eta_{\text{НОМ1}}$	0,87	0,86	0,89	0,87	0,76	0,88	0,9	0,84	0,9	0,91
$n_1$ , ШТ	15	10	14	8	10	16	2	10	5	1
$P_{\text{НОМ2}}$ , кВт	7,5	30	4	15	45	11	18,5	22	37	5,5
$\cos\varphi_{\text{НОМ2}}$	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
$\eta_{\text{НОМ1}}$	0,86	0,9	0,84	0,76	0,91	0,87	0,88	0,89	0,9	0,87
$n_2$ , ШТ	10	5	10	16	6	10	4	12	2	10
$P_{\text{НОМ3}}$ , кВт	22	11	7,5	37	5,5	15	4	30	45	18,5
$\cos\varphi_{\text{НОМ3}}$	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
$\eta_{\text{НОМ3}}$	0,89	0,87	0,86	0,9	0,87	0,76	0,84	0,9	0,91	0,88
$n_3$ , ШТ	8	10	15	6	20	10	5	5	2	4

### Задача 2.3.6.

Для однофазного трансформатора відомі наступні величини: номінальна потужність  $S_{\text{НОМ}}$ ; напруга на первинній  $U_{\text{НОМ1}}$  та вторинній  $U_{\text{НОМ2}}$  обмотках; діюче значення напруги на один виток  $U_{\text{В}}$ ; амплітудне

значення індукції  $B_m$ ; густина струму в первинній  $\Delta_1$  та вторинній обмотках  $\Delta_2$ ; частота струму мережі  $f = 50$  Гц. Необхідно визначити наступні величини: числа витків первинної  $W_1$  та вторинної обмоток  $W_2$ ; перерізи проводів обмоток  $\Pi_{\text{эф1(2)}}$ ; переріз стрижня магнітопроводу  $\Pi_c$ . Дані для свого варіанта взяти з табл. 2.7.

### Задача 2.3.7.

Трифазний стрижневий трансформатор характеризується наступними номінальними величинами: номінальною потужністю  $S_{\text{ном}}$ ; номінальними напругами первинної  $U_{\text{ном1}}$  і вторинної  $U_{\text{ном2}}$  обмоток. Від трансформатора споживається активна потужність  $P_2$  при коефіцієнті потужності  $\cos\varphi_2$ . Переріз стрижня магнітопроводу  $\Pi_c$ ; амплітудне значення індукції  $B_m$ ; частота струму мережі  $f = 50$  Гц. Обмотки з'єднані за схемою трикутник/зірка. Визначити: 1) номінальні струми в обмотках  $I_{\text{ном1}}$  і  $I_{\text{ном2}}$ ; 2) коефіцієнт навантаження трансформатора  $k_n$ ; 3) струми в обмотках  $I_1$  і  $I_2$  при фактичному навантаженні; 4) числа витків первинної  $W_1$  та вторинної обмоток  $W_2$ ; 5) ККД трансформатора при фактичному навантаженні. Дані для свого варіанта взяти з табл. 2.8. Відсутні величини взяти з табл. 2.4.

Таблиця 2.7

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$ , кВА	10	16	25	40	63	100	160	250	400	630
$U_{\text{ном1}}$ , В	6000	5000	6000	5000	6000	5000	10000	10000	10000	10000
$U_{\text{ном2}}$ , В	400	230	400	230	400	400	690	400	690	690
$U_B$ , В	3,26	3,1	3,52	2,8	3,54	4,26	5,1	2,79	3,42	2,96
$B_m$ , Тл	1,4	1,3	1,5	1,2	1,35	1,8	1,45	1,5	1,6	1,7
$\Delta_1$ , А/мм <sup>2</sup>	2,8	2,85	2,87	2,95	3,0	3,2	2,74	2,9	3,14	3,3
$\Delta_2$ , А/мм <sup>2</sup>	3,0	3,2	3,1	3,3	3,35	3,2	2,95	3,1	3,4	3,5

Таблиця 2.8

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600
$U_{\text{НОМ1}}$ , В	6000	5000	6000	5000	6000	5000	10000	10000	10000	10000
$U_{\text{НОМ2}}$ , В	400	230	400	230	400	400	690	400	690	690
$\Pi_{\text{с}}$ , см <sup>2</sup>	170	200	230	250	280	300	340	400	450	480
$B_m$ , Тл	1,4	1,3	1,5	1,2	1,35	1,8	1,45	1,5	1,6	1,7
$P_2$ , кВт	21	33	55	83	127	215	320	580	830	1200
$\cos\varphi_2$	0,9	0,91	0,94	0,89	0,92	0,91	0,88	0,93	0,92	0,9

## Задача 2.3.8

На підставі даних векторної діаграми однофазного трансформатора при неробочому руху, які приведено в таблиці 2.9 визначити наступні величини: коефіцієнт трансформації  $K$ ; втрати в сталі  $P_{\text{ст}}$  (втрати на нагрів первинної обмотки знехтувати); числа витків обмоток, при частоті струму мережі  $f = 50$  Гц. Приймаючи СНР 5% від номінального первинного струму знайти номінальні струми  $I_{\text{НОМ1(2)}}$  в обмотках і номінальну потужність  $S_{\text{НОМ}}$  трансформатора.

Таблиця 2.9

Варіанти	$U_1$ ,	$I_x$ ,	$E_2$ ,	$\Phi_m$ ,	$\varphi_x$ ,	Варіанти	$U_1$ ,	$I_x$ ,	$E_2$ ,	$\Phi_m$ ,	$\varphi_x$ ,
	В	А	В	Вб	град		В	А	В	Вб	град
21	500	0,15	36	0,002	85	26	500	0,12	24	0,0016	83
22	380	0,2	220	0,0015	80	27	380	0,25	127	0,0025	84
23	220	0,5	500	0,008	86	28	220	0,3	380	0,002	77
24	127	0,1	12	0,0012	78	29	127	0,16	24	0,001	75
25	660	0,18	24	0,0018	75	30	660	0,22	36	0,0019	82

## 2.4. Завдання для самостійної роботи

### Задача 2.4.1

Визначити параметри Г-образної заступної схеми однофазного трансформатора номінальної потужності  $S_{\text{ном}} = 8,8$  кВ·А, номінальної напруги  $U_{\text{ном1}} = 220$  В за даними дослідів неробочого руху і короткого замикання:  $P_x = 50$  Вт,  $I_x = 2$  А,  $P_k = 800$  Вт,  $U_k = 32$  В. (Відповідь:  $R_0 = 12,5$  Ом,  $X_0 = 109$  Ом,  $R_k = 0,5$  Ом,  $X_k = 0,625$  Ом)

### Задача 2.4.2

Активний перетин сталі магнітопровода трансформатора  $\Pi = 10$  см<sup>2</sup> обхвачений обмотками з кількістю витків:  $W_1 = 836$  і  $W_2 = 182$ . Визначити діючи і миттєві значення ЕРС взаємної індукції, які індукуються в обмотках головним магнітним потоком  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  при амплітудному значенні магнітної індукції  $B_m = 1,19$  Тл та кутової частоті  $\omega = 314$  рад/с. (Відповідь:  $E_1 = 220,9$  В,  $E_2 = 48,1$  В,  $e_1 = 312,4 \cos 314t$  В,  $e_2 = 68 \cos 314t$  В)

### Задача 2.4.3

Напруги первинної обмотки трансформатора  $U_1 = 230$  В та вторинної обмотки  $U_2 = 5770$  В. Для визначення числа витків трансформатора на осерді розташували додаткову обмотку з 20 витків. В режимі неробочого руху напруга на додатковій обмотці  $U_d = 140$  В. Визначити напругу, яка приходить на один виток та кількість витків обох обмоток. Частота струму мережі  $f = 50$  Гц. Визначити також амплітудне значення головного магнітного потоку. (Відповідь: 7 В,  $W_1 = 33$ ,  $W_2 = 825$ ,  $\Phi_m = 0,0314$  Вб)

#### Задача 2.4.4

Визначити активну складову СНР трансформатора при номінальній напрузі  $U_{\text{ном1}} = 5770$  В, якщо індукції у ярмі  $B_{\text{я}} = 1,4$  Тл, а індукція у стрижні  $B_{\text{с}} = 1,46$  та частота мережі  $f = 50$  Гц. Маса ярма трансформатора  $m_{\text{я}} = 300$  кг, маса стержнів  $m_{\text{с}} = 435$  кг. Магнітопровід виконано з електротехнічної сталі з питомими втратами  $p_{1,0/50} = 0,5$  Вт/кг. (Відповідь:  $I_{0a} = 0,131$  А)

#### Задача 2.4.5

Якою є зміна реактивної складової СНР трансформатора, якщо частота струму мережі знизиться з 50 до 49 Гц? Амплітудне значення магнітної індукції у осерді трансформатора виконаного з електротехнічної сталі 3413 становить  $B_m = 1,65$  Тл. (Відповідь: 1,16)

#### Задача 2.4.6

Визначити приведені струми вторинної обмотки трансформатора, якщо ЕРС взаємної індукції  $E_1 = 10$  кВ,  $E_2 = 400$  В, струм  $I_2 = 145$  А. (Відповідь:  $I_2' = 1,6$  А)

#### Задача 2.4.7

Числа витків обмоток трансформатора невеликої потужності  $W_1 = 792$  і  $W_2 = 264$ . Активно-індуктивному навантаженню ( $I_2 = 1$  А,  $\cos \varphi_2 = 0,8$ ) відповідає напруга на вторинній обмотці  $U_2 = 110$  В. За допомогою векторної діаграми визначити первинний струм и напругу трансформатора, якщо опори обмоток трансформатора  $Z_1 = Z_2' = 11 + j20$  Ом, а повний опір первинної обмотки при неробочому русі  $Z_0 = 300 + j3000$  Ом. (Відповідь:  $U_1 = 346,4$  В,  $I_1 = 0,42$  А)

#### Задача 2.4.8

Визначити активний опір вітки намагнічування у відносних одиницях, якщо відомі магнітні втрати  $P_m = 7,6$  кВт і СНР складає 2% від номінального струму трансформатора з номінальною потужністю  $S_{ном} = 630$  кВ·А. (Відповідь:  $R_{*0} = 30$  Ом)

#### Задача 2.4.9

Число витків на фазу обмотки високої напруги трифазного трансформатора  $W_1 = 850$ , низької напруги –  $W_2 = 34$ . При вмиканні в мережу з напругою 10 кВ на вторинній обмотці лінійна напруга дорівнює 400 В. По якій схемі з'єднана обмотка низької напруги, якщо відомо, що обмотка високої напруги з'єднана в зірку? (Відповідь: зірка)

#### Задача 2.4.10

Трифазний трансформатор зі схемою з'єднання  $Y/\Delta$  і номінальними лінійними напругами  $U_{ном1} = 10$  кВ і  $U_{ном2} = 0,4$  кВ має напругу на виток  $U_b = 2,5$  В/виток. Визначити числа витків обмоток. (Відповідь:  $W_1 = 2312$ ,  $W_2 = 160$ )

### 3. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

#### 3.1. Короткі теоретичні відомості

Асинхронною називається машина змінного струму у якої тільки одна первинна обмотка вмикається до електричної мережі а друга вторинна обмотка замикається накоротко або на електричні опори. Асинхронні машини (АМ) принципово можуть бути генераторами або двигунами, але в основному АМ використовуються в якості двигунів, які порівняно з іншими типами електричних двигунів простіші, надійніші та мають більш високий коефіцієнт корисної дії (ККД). В залежності від конструкції ротора асинхронні двигуни (АД) поділяють на два типи: з короткозамкненим та з фазним ротором.

Найбільш поширеними в використанні є трифазні АД, в яких первинна обмотка статора виконується трифазною та створює обертове магнітне поле. Частота обертання поля  $n_1$  залежить від кількості пар полюсів  $p$  АМ та частоти струму мережі  $f_1$ :

$$n_1 = 60 f_1 / p .$$

Ротор АМ обертається асинхронно, тобто зі швидкістю  $n_2$ , що відрізняється від  $n_1$ . Відносна різниця між частотами обертання поля та ротора називається ковзанням

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 .$$

Діючі значення електрорушійної сили, які наводяться в фазах обмотки статора  $E_1$ , нерухомого ротора  $E_2$  та ротора, який обертається  $E_{2s}$  відповідно визначаються виразами:

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m k_{o1}; E_2 = 4,44 f_1 W_2 \Phi_m k_{o2}, E_{2s} = 4,44 f_{2s} W_2 \Phi_m k_{o2}$$

де  $W_{1(2)}$  – кількість витків обмоток статора та ротора;  $\Phi_m$  – амплітудне значення магнітного потоку,  $k_{o1(2)}$  – обмотковий коефіцієнт;  $f_{2s} = sf_1$  – частота струму ротора, який обертається.



Відношення ЕРС обмоток називається коефіцієнтом трансформації АМ

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{o1}W_1}{k_{o2}W_2}.$$

Обертовий момент на валу АД пов'язаний з корисною механічною потужністю  $P_2$  на валу співвідношенням

$$M = 9,55P_2/n_2.$$

Потужність  $P_1$ , яка споживається АД з мережі визначається виразом

$$P_1 = \sqrt{3}U_1I_1 \cos\varphi_1,$$

де  $U_1$ ,  $I_1$  – відповідно лінійні значення напруги та струму;  $\cos\varphi_1$  – коефіцієнт потужності.

Струми в нерухомому роторі та в роторі, який обертається визначають зі співвідношень:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}; I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}},$$

де  $R_2$  – активний опір обмотки ротора;  $X_2$  – індуктивний опір нерухомого ротора;  $X_{2s} = X_{2s}$  – індуктивний опір ротора, який обертається.

ККД АД визначається відношенням механічної потужності на валу  $P_2$  до потужності  $P_1$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P},$$

де  $\Sigma P$  – сумарні втрати, які складаються з електричних втрат в обмотках статора та ротора, магнітних втрат, механічних та додаткових втрат.

Електромагнітна потужність

$$P_{em} = M_{em} \omega,$$

де  $M_{\text{ем}}$  – електромагнітний момент;  $\omega = 2\pi n/60$  – кутова швидкість обертання.

Число пазів  $Z_1$  в обмотці статора

$$Z_1 = 2qpm,$$

де  $q$  – число пазів, які приходяться на полюс і фазу;  $m$  – кількість фаз обмотки.

Синхронною називається двохобмоткова електрична машина, одна з обмоток якої (обмотки якоря) з'єднана з мережею змінного струму, а друга (обмотка збудження) живиться постійним струмом. В синхронних машинах (СМ) перетворення енергії відбувається внаслідок обертання постійного магнітного потоку відносно обмотки якоря. СМ використовуються в якості двигунів, але найбільш поширені як генератори (СГ). Конструктивно СМ поділяються на явнополюсні і неявнополюсні.

Частота обертання ротора машини дорівнює синхронній частоті обертання магнітного поля  $n_2 = n_1$  та визначається частотою струму мережі  $f_1$  і кількістю пар полюсів  $p$ :

$$n_1 = 60f_1/p.$$

Фазна напруга СМ визначається виразом

$$\dot{U}_\phi = \dot{E} - \dot{U}_a - \dot{U}_s - \dot{U}_R,$$

де  $\dot{E}$  – ЕРС СМ;  $\dot{U}_a$  – падіння напруги на індуктивному опорі реакції якоря (в явно полюсних СМ необхідно розділити на продольну і поперечну складові);  $\dot{U}_s$  – падіння напруги на індуктивному опорі розсіяння;  $\dot{U}_R$  – падіння напруги на активному опорі обмотки якоря.

### 3.2. Приклади рішення типових задач

#### Приклад 3.2.1

Трифазний АД з короткозамкненим ротором має номінальні данні: корисну потужність  $P_{\text{ном2}} = 11$  кВт; напругу  $U_{\text{ном}} = 380$  В; частота обертання ротора  $n_2 = 975$  об/хв.; ККД  $\eta_{\text{ном}} = 0,86$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_1 = 0,83$ . Частота струму в мережі  $f_1 = 50$  Гц. Визначити наступні величини: потужність  $P_1$ , яка споживається двигуном; номінальний момент  $M_{\text{ном}}$ ; струм обмотки статора  $I_1$ ; ковзання  $s$ ; частоту струму в роторі  $f_{2s}$ ; сумарні втрати  $\Sigma P$ .

Рішення.

Потужність, яка споживається двигуном з мережі

$$P_1 = P_{\text{ном2}} / \eta_{\text{ном}} = 11 / 0,86 = 12,8 \text{ кВт.}$$

Номінальний момент двигуна

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном2}} / n_2 = 9,55 \cdot 11000 / 975 = 107,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Струм фази обмотки статора

$$I_1 = \frac{P_{\text{ном2}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos\varphi_1} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,86 \cdot 0,83} = 23,4 \text{ А.}$$

Визначається ковзання

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 = (1000 - 975) / 1000 = 0,025.$$

Сумарні втрати потужності визначаються за співвідношенням

$$\Sigma P = P_1 - P_{\text{ном2}} = 12,8 - 11 = 1,8 \text{ кВт.}$$

Визначається частота струму в роторі

$$f_{2s} = f_1 s = 50 \cdot 0,025 = 1,25 \text{ Гц.}$$

#### Приклад 3.2.2

Кожна з фаз обмотки статора трифазного АД з фазним ротором має  $W_1 = 150$  витків і обмотковий коефіцієнт  $k_{o1} = 0,97$ . Амплітуда магнітного потоку  $\Phi_m = 0,006$  Вб. Частота струму мережі  $f_1 = 50$  Гц.

Активний опір фази обмотки ротора  $R_2 = 0,4$  Ом, індуктивний опір фази нерухомого ротора  $X_2 = 4,2$  Ом. При обертанні ротора з частотою  $n_2 = 980$  об/хв. в фазі ротора наводиться ЕРС  $E_{2s} = 10$  В. Визначити: ЕРС  $E_1$  в фазі обмотки статора; ЕРС  $E_2$  в фазі обмотки нерухомого ротора; струм в фазі ротора при нормальній роботі  $I_2$  та в момент пуску  $I_{2п}$ .

Рішення.

Визначається ЕРС в фазі статора

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m k_{ol} = 4,44 \cdot 50 \cdot 150 \cdot 0,006 \cdot 0,97 = 194 \text{ В.}$$

Визначається ковзання

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 = (1000 - 980) / 1000 = 0,02.$$

ЕРС в фазі нерухомого ротора визначаємо зі співвідношення  $E_{2s} = E_2 s$ ,

$$E_2 = E_{2s} / s = 10 / 0,02 = 500 \text{ В.}$$

Струм в фазі ротора в момент пуску

$$I_{2п} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{500}{\sqrt{0,4^2 + 4,2^2}} = 119 \text{ А.}$$

Визначається індуктивний опір ротора, який обертається

$$X_{2s} = X_2 s = 4,2 \cdot 0,02 = 0,084 \text{ Ом.}$$

Струм в фазі ротора, який обертається

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{10}{\sqrt{0,4^2 + 0,084^2}} = 24 \text{ А.}$$

### Приклад 3.2.3

Визначити активний опір фази обмотки якоря, а також індуктивні опори розсіяння і основного поля трифазного СГ з циліндричним ротором. Повна потужність генератора  $S_{ном} = 100$  кВ·А; лінійна напруга  $U_{ном} = 380$  В; коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = 0,8$  (характер

навантаження активно-індуктивний  $P = 70$  кВт). Відносні значення падіння напруги в колі якоря  $u_a = 70$  %;  $u_s = 20$  %;  $u_r = 10$  %. Визначити також струм якоря при заданому навантаженні.

Рішення

Номинальний струм якоря

$$I_{\text{аном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3U_{\phi}} = \frac{100000}{3 \cdot 220} = 151,5 \text{ А.}$$

Струм якоря при заданому навантаженні

$$I_a = \frac{P}{3U_{\phi} \cos \varphi} = \frac{70000}{3 \cdot 220 \cdot 0,8} = 132,6 \text{ А.}$$

Визначається активний опір:

$$U_R = 0,1U_{\phi} = 0,1 \cdot 220 = 22 \text{ В}; U_R = I_{\text{аном}} R_a;$$

$$R_a = U_R / I_{\text{аном}} = 22 / 151,5 = 0,145 \text{ Ом.}$$

Аналогічно визначаються індуктивні опори:

$$X_s = \frac{U_s}{I_{\text{аном}}} = \frac{0,2U_{\phi}}{I_{\text{аном}}} = \frac{0,2 \cdot 220}{151,5} = 0,29 \text{ Ом};$$

$$X_a = \frac{U_a}{I_{\text{аном}}} = \frac{0,7U_{\phi}}{I_{\text{аном}}} = \frac{0,7 \cdot 220}{151,5} = 1,02 \text{ Ом.}$$

### 3.3. Завдання до контрольної роботи № 3

#### Задача 3.3.1

Трифазний АД працює в номінальному режимі. Двигун споживає з мережі потужність  $P_1$  при номінальній напрузі  $U_{\text{ном}}$  і номінальному струмі  $I_{\text{ном}}$ . Механічна потужність на валу  $P_{\text{ном2}}$ . Сумарні втрати в АД дорівнюють  $\Sigma P$ , його ККД  $\eta_{\text{ном}}$ . Коефіцієнт потужності двигуна  $\cos \varphi_1$ . Обертний момент АД  $M_{\text{ном}}$ , пусковий та максимальний моменти відповідно  $M_{\text{п}}$  і  $M_{\text{max}}$ . Перевантажна здатність двигуна  $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$ ,

кратність пускового моменту  $M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$ . Синхронна частота обертання АД  $n_1$ , ковзання при номінальному навантаженні  $s_{\text{НОМ}}$ . Частота обертання ротора дорівнює  $n_{\text{НОМ}2}$ . Частота струму в мережі  $f_1=50$  Гц. Використовуючи дані, приведені в табл. 3.1, визначити величини, відзначені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 3.1

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{НОМ}2}$ , кВт	11	5,5	-	4	30	-	-	55	-	-
$P_1$ , кВт	-	-	59	4,76	-	-	33	-	-	12,5
$\Sigma P$ , кВт	-	-	-	-	-	1,3	3	4	0,76	1,5
$U_{\text{НОМ}}$ , В	380	660	380	220	660	-	-	380	220	-
$I_{\text{НОМ}}$ , А	-	-	-	-	32	7,4	32	99,7	-	21
$\eta_{\text{НОМ}}$	0,87	0,81	0,93	-	0,91	0,81	-	-	0,84	-
$\cos\phi_1$	0,9	0,8	0,9	0,84	-	0,8	0,9	-	0,84	0,9
$M_{\text{НОМ}}$ , Н·м	-	-	357	26,8	-	54,7	-	-	-	-
$M_{\text{max}}$ , Н·м	-	120	-	-	-	-	584	786	59	79,6
$M_{\Pi}$ , Н·м	-	-	429	-	350	109	-	-	59	58
$M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}$	2,2	-	2,2	2,2	2	2,2	2	-	-	-
$M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$	1,6	2	-	2,2	-	-	1,2	1,2	-	-
$n_{\text{НОМ}2}$ , об/хв	-	960	-	-	980	-	-	1470	1455	2920
$n_1$ , об/хв	3000	-	1500	-	-	1000	1000	-	1500	3000
$s_{\text{НОМ}}$ , %	3,3	4	-	5	2	-	-	2	-	-

### Задача 3.3.2

Трифазний АД з короткозамкненим ротором характеризується наступними номінальними величинами: потужність на валу  $P_{\text{НОМ}2}$ ; обертний момент  $M_{\text{НОМ}}$ ; напруга  $U_{\text{НОМ}}$ ; струм фази статора  $I_{\text{НОМ}}$ ; ККД  $\eta_{\text{НОМ}}$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\phi_{\text{НОМ}}$ . Частота обертання ротора дорівнює  $n_{\text{НОМ}2}$  при ковзанні  $s_{\text{НОМ}}$ . Синхронна частота обертання АД  $n_1$ , число пар полюсів дорівнює  $p$ . Частота струму в мережі  $f_1$ , частота струму в роторі  $f_{2s}$ . Використовуючи дані, приведені в табл. 3.2, визначити величини, відзначені прочерками в таблиці варіантів.

Таблиця 3.2

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_{\text{ном2}}$ , кВт	-	4,5	-	100	-	18	-	20	-	5
$U_{\text{ном}}$ , В	380	220	-	-	380	660	380	220	220	380
$I_{\text{ном}}$ , А	-	-	10	114	30	21	-	70	8	-
$\eta_{\text{ном}}$	0,85	0,86	0,85	0,91	0,88	-	0,89	0,9	0,89	0,86
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,83	0,82	0,83	0,85	0,85	0,84	0,85	-	0,85	0,8
$M_{\text{ном}}$ , Н·м	120	-	60	-	-	-	250	-	-	-
$n_{\text{ном2}}$ , об/хв	-	-	-	980	1450	950	-	2850	-	-
$n_1$ , об/хв	-	-	-	1000	-	1000	3000	-	750	1500
$s_{\text{ном}}$ , %	-	5	2	-	-	-	2,5	5	-	-
$p$	3	1	4	-	2	-	-	1	-	-
$f_1$ , Гц	50	100	50	-	50	50	-	-	100	50
$f_{2s}$ , Гц	2,5	-	-	1	-	-	2,5	-	4	2

## Задача 3.3.3

Для трифазного АД в табл. 3.3 задані наступні величини: сумарні втрати потужності  $\Sigma P$ ; ККД  $\eta_{\text{ном}}$ ; синхронна частота обертання  $n_1$ ; частота струму в роторі  $f_{2s}$ . Частота струму в мережі  $f_1=50$  Гц. Визначити: потужність, яку двигун споживає з мережі  $P_1$ ; корисну потужність  $P_{\text{ном2}}$ ; ковзання  $s_{\text{ном}}$ ; частоту обертання ротора  $n_{\text{ном2}}$ ; кількість полюсів  $2p$ .

Таблиця 3.3

Величини	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\Sigma P$ , кВт	0,65	1,5	1,64	3,33	4,11	0,76	2,14	1,22	4,78	2,4
$\eta_{\text{ном}}$	0,86	0,88	0,87	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9
$n_1$ , об/хв	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	1500	1000
$f_{2s}$ , Гц	2	1,67	1,33	1,67	0,87	0,67	1,25	2,5	1,17	1,3

### Задача 3.3.4

Трифазний АД з фазним ротором характеризується наступними величинами: числа витків обмоток статора і ротора відповідно дорівнюють  $W_1$  і  $W_2$ ; коефіцієнт обмотки статора (ротора)  $k_{o1(2)}$ ; амплітуда обертового магнітного потоку  $\Phi_m$ . Діючі значення електрорушійної сили, які наводяться в фазах обмотки статора  $E_1$ , нерухомого ротора  $E_2$  та ротора, який обертається  $E_{2s}$ . Число пар полюсів АД дорівнює  $p$ . Синхронна частота обертання двигуна  $n_1$ , частота обертання ротора дорівнює  $n_2$ , ковзання АД  $s$ , частота струму в мережі  $f_1=50$  Гц, частота струму в роторі  $f_{2s}$ . Використовуючи дані АД, приведені в таблиці 3.4, визначити усі величини відзначені прочерками.

Таблиця 3.4

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_1$	48	100	-	-	50	180	-	146	60	-
$W_2$	-	70	45	13	-	60	36	-	30	60
$k_{o1}$	0,94	0,96	0,94	0,95	0,96	0,97	0,93	0,95	0,97	0,96
$k_{o2}$	0,95	0,98	0,95	0,97	0,97	0,98	0,95	0,97	0,95	0,96
$\Phi_m, \text{Вб}$	0,035	-	0,05	-	0,02	0,006	-	0,007	-	-
$E_1, \text{В}$	-	200	100	360	-	-	110	-	130	211
$E_2, \text{В}$	-	-	-	100	-	-	50	200	-	-
$E_{2s}, \text{В}$	4	-	-	-	5	-	-	8	-	2,1
$p$	-	-	1	3	-	-	-	-	6	-
$s, \%$	-	8	-	4	-	-	3	-	-	3
$n_1, \text{об/хв}$	1000	-	-	-	1000	1500	-	-	-	-
$n_2, \text{об/хв}$	960	920	-	-	950	-	970	1440	-	1445
$f_{2s}, \text{Гц}$	-	-	2,5	-	-	1,5	-	-	5	-

### Задача 3.3.5

В трифазному АД з фазним ротором в фазі ротора у момент пуску наведено ЕРС  $E_2$ . При обертанні ротора з ковзанням  $s$  в фазі ротора наведено ЕРС  $E_{2s}$ . Активний опір фази обмотки ротора  $R_2$ , індуктивний



опір фази нерухомого ротора та ротора, який обертається відповідно  $X_2$  і  $X_{2s}$ . Частота струму в роторі  $f_{2s}$ , частота струму в мережі  $f_1=50$  Гц. Число пар полюсів АД дорівнює  $p$ . Синхронна частота обертання двигуна  $n_1$ , частота обертання ротора дорівнює  $n_2$ . В фазі обмотки ротора в момент пуску виникає струм  $I_{2п}$ ; при обертанні ротора –  $I_{2п}$ . Використовуючи дані АД, приведені в таблиці 3.5, визначити усі величини відзначені прочерками.

Таблиця 3.5

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$E_2, В$	120	-	-	250	-	750	125	150	-	-
$E_{2s}, В$	-	6	-	-	5	-	-	-	10	3,6
$s, \%$	3	-	2	4	-	-	4	4	-	-
$R_2, Ом$	0,15	-	0,3	-	0,6	-	-	0,5	0,25	-
$X_2, Ом$	0,5	1,5	-	0,5	-	2	2,5	-	-	-
$X_{2s}, Ом$	-	-	0,04	-	0,1	-	-	0,06	0,02	0,015
$f_{2s}, Гц$	-	-	-	-	2	1	-	-	-	1,5
$p$	-	-	4	2	-	-	1	4	-	3
$n_1, об/хв$	1000	750	-	-	-	-	-	-	1500	-
$n_2, об/хв$	-	720	-	-	2880	735	-	-	1440	-
$I_{2п}, А$	-	95	-	449	-	371	-	-	-	231
$I_2, А$	-	-	50	-	-	-	8	-	-	-

### Задача 3.3.6

В табл. 3.6 приведено величини, які характеризують трифазний АД з фазним ротором: потужність на валу  $P_{ном2}$ ; напруга  $U_{ном}$ ; частота обертання ротора  $n_{ном2}$ ; ККД  $\eta_{ном}$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\phi_{ном}$ ; кратність пускового струму  $I_{п}/I_{ном}$ ; перевантажна здатність  $M_{max}/M_{ном}$ ; кратність пускового моменту  $M_{п}/M_{ном}$ . Необхідно визначити наступні величини: номінальний  $I_{ном}$  і пусковий  $I_{п}$  струми; номінальний  $M_{ном}$ , максимальний  $M_{max}$  і пусковий  $M_{п}$  моменти при номінальній напрузі;

кратність пускового струму, кратність пускового моменту та перевантажну здатність при зниженні напруги на 10 %. Можливо лі в цьому випадку запустити двигун при номінальному навантаженні?

Таблиця 3.6

Величини	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_{\text{НОМ2}}$ , кВт	11	30	37	15	5,5	15	7,5	18,5	45	2,2
$U_{\text{НОМ}}$ , В	380	660	380	380	660	380	660	380	660	380
$n_{\text{НОМ2}}$ , об/хв	2900	1460	740	975	2880	1465	730	970	740	1400
$\eta_{\text{НОМ}}$	0,88	0,9	0,9	0,875	0,87	0,865	0,86	0,87	0,91	0,8
$\cos\varphi_1$	0,9	0,87	0,83	0,82	0,91	0,84	0,78	0,8	0,84	0,88
$I_{\text{II}}/I_{\text{НОМ}}$	7,5	7,5	6	7	7,5	7,5	6,5	7	6	6
$M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}$	2,2	2,2	1,7	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1,7	2,2
$M_{\text{II}}/M_{\text{НОМ}}$	1,6	2	1,2	2	2	2	1,8	2	1,2	2

### Задача 3.3.7

Трифазний неявнополюсний СГ характеризується наступними величинами, які приведено в табл. 3.7: повна потужність  $S_{\text{НОМ}}$ ; лінійна напруга  $U_{\text{НОМ}}$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ ; індуктивний опір розсіяння  $X_s$ ; індуктивний опір основного магнітного поля  $X_a$ ; кількість полюсів  $2p$ . Використав данні табл. 3.8 необхідно визначити наступні величини: кут навантаження  $\beta$ ; синхронну частоту обертання  $n_1$ ; відносні значення індуктивних опорів при номінальному навантаженні, якщо СГ перезбуджено. Частота струму в мережі  $f_1=50$  Гц. Побудувати векторну діаграму СГ.

Таблиця 3.7

Величини	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	250	200	185	150	125	100	90	75	65	50
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	800	670	400	500	800	400	500	460	400	230
$\cos\varphi$	0,7	0,72	0,75	0,78	0,8	0,72	0,69	0,79	0,7	0,76
$X_s, \text{Ом}$	0,172	0,196	0,231	0,256	0,287	0,567	0,413	0,324	0,384	0,548
$X_a, \text{Ом}$	2,6	4,03	2,13	3,46	3,81	2,43	1,98	3,5	3,77	4,11
$2p$	8	10	6	8	12	6	10	8	6	4

## Задача 3.3.9

Визначити ЕРС явнополюсного трифазного СГ і падіння напруги на індуктивних опорах основного поля по продольній та поперечній вісях, який експлуатується з номінальним навантаженням в режимі перезбудження. В табл. 3.8 приведено величини, які характеризують генератор: повна потужність  $S_{\text{ном}}$ ; лінійна напруга  $U_{\text{ном}}$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ ; індуктивний опір розсіяння  $X_s$ ; індуктивний опір основного магнітного поля у продольному напрямку  $X_{ad}$ ; індуктивний опір основного магнітного поля у поперечному напрямку  $X_{aq}$ ; кількість полюсів  $2p$ ; активний опір фази обмотки якоря  $R_a$ ; частота мережі  $f_1$ . Обмотка якоря з'єднана зіркою.

Таблиця 3.8

Величини	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$S_{\text{ном}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	250	200	185	150	125	100	90	75	65	50
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	800	670	400	500	800	400	500	460	400	230
$\cos\varphi$	0,7	0,72	0,75	0,78	0,8	0,72	0,69	0,79	0,7	0,76
$X_s, \text{Ом}$	0,172	0,196	0,231	0,256	0,287	0,567	0,413	0,324	0,384	0,548
$X_{ad}, \text{Ом}$	2,6	4,03	2,13	3,46	3,81	2,43	1,98	3,5	3,77	4,11
$X_{aq}, \text{Ом}$	1,26	2,45	0,79	1,24	1,76	1,59	0,73	1,56	1,87	2,15
$R_a, \text{Ом}$	0,035	0,065	0,023	0,024	0,043	0,078	0,094	0,036	0,029	0,081
$2p$	8	10	6	8	12	6	10	8	6	4
$f_1, \text{Гц}$	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50

### Задача 3.3.9

В табл. 3.9 приведено номінальні величини, які характеризують трифазний СГ: повна потужність  $S_{\text{ном}}$ ; лінійна напруга  $U_{\text{ном}}$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ ; струм збудження  $I_3$ ; напруга збудження  $U_3$ ; ККД збуджувача  $\eta_3$ ; втрати в сталі  $P_{\text{ст}}$ ; додаткові втрати  $P_{\text{д}}$  (вказані у відсотках від номінальної потужності  $P_{\text{ном}2}$ ); механічні втрати  $P_{\text{мех}}$ ; опір фази обмотки статора  $R_{75}$  при температурі  $75^\circ\text{C}$ . Необхідно визначити ККД СГ при номінальному навантаженні.

Таблиця 3.9

Величини	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	500	450	400	350	300	550	600	650	700	1000
$U_{\text{ном}}$ , В	400	400	230	400	230	400	230	230	400	230
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,92	0,9	0,82	0,86	0,95	0,88	0,9	0,85	0,87	0,83
$I_3$ , А	100	90	110	85	80	110	95	100	92	88
$U_3$ , В	32	30	28	26	24	26	28	30	32	40
$\eta_3$	0,9	0,85	0,88	0,92	0,84	0,96	0,91	0,93	0,87	0,82
$P_{\text{ст}}$ , кВт	5,4	4,6	3,9	3,6	3,0	5,2	5,8	6,5	7,2	8,9
$P_{\text{д}}$ , %	0,38	0,46	0,52	0,63	0,44	0,32	0,54	0,48	0,58	0,62
$P_{\text{мех}}$ , кВт	1,2	1,3	1,6	1,7	1,8	1,9	1,3	1,4	1,5	1,6
$R_{75}$ , Ом	1,6	1,8	1,7	1,4	1,3	1,2	1,0	0,8	1,75	1,8

### Задача 3.3.10

Накреслити схему трифазної двошарової якірної обмотки машини змінного струму за даними, які приведено в табл. 3.10:  $Z$  – число пазів статора;  $2p$  – число полюсів машини;  $y/\tau$  – відносний крок, який визначає скорочення.

Таблиця 3.10

Варіанти	Величини		
	$Z$	$2p$	$y/\tau$
1	24	2	1
2	24	4	1
3	24	8	1
4	24	2	5/6
5	24	4	5/6
6	24	8	5/6
7	36	2	1
8	36	4	1
9	36	6	1
10	36	2	5/6
11	36	4	7/9
12	36	6	5/6
13	48	2	1
14	48	4	1
15	48	8	1
16	48	2	21/24
17	48	4	5/6
18	48	8	5/6
19	30	2	1
20	30	2	4/5
21	54	6	1
22	54	6	7/9
23	18	2	1
24	18	2	7/9
25	18	6	1
26	42	2	1
27	42	2	17/21
28	36	4	8/9
29	48	4	11/12
30	24	2	11/12

### 3.4. Завдання для самостійної роботи

#### Задача 3.4.1

Статор асинхронної машини з внутрішнім діаметром  $D_i = 185$  мм має 48 напівзакритих трапецеїдальних пазів. Знайти ширину зубця статора при індукціях в зубці  $B_{z1} = 1,8$  Тл, в зазорі  $B_m = 0,75$  Тл. Коефіцієнт заповнення пакету сталлю 2013  $k_{ст} = 0,95$ , радіальні вентиляційні канали відсутні ( $l_{m1} = l_{\delta}$ ). Визначити магнітну напруженість

зубців статора, якщо висота паза  $h_{z1} = 19,2$  мм. (Відповідь:  $b_{z1} = 5,3$  мм,  $F_{z1} = 134,4$  А).

#### Задача 3.4.2

Прийняв індукцію в ярмі статора асинхронної машини  $B_{a1} = 1,55$  Тл, визначити висоту спинки статора  $h_{a1}$ , якщо амплітуда синусоїдально розподіленої індукції в зазорі  $B_m = 0,77$  Тл. Поліусний крок машини  $\tau = 145$  мм. При рішенні задачі вважати, що розрахункова довжина машини дорівнює довжині пакетів статора. Коефіцієнт заповнення пакету сталлю  $k_{ст} = 0,95$ . (Відповідь  $h_{a1} = 24,1$  мм).

#### Задача 3.4.3

З розрахунку магнітного кола чотирьохполіусної асинхронної машини з трифазною обмоткою статора, число витків в фазі котрої  $W_1 = 126$ , обмотковий коефіцієнт  $k_{o1} = 0,96$ , отримані напруженості магнітного поля: зубців статора  $F_{z1} = 1520$  А/м, зубців ротора  $F_{z2} = 1150$  А/м, ярма статора  $F_{a1} = 940$  А/м, ярма ротора  $F_{a2} = 70$  А/м, повітряного зазору  $F_{\delta} = 0,9/\mu_0$  для відповідних ділянок  $L_{z1} = 18,5$  мм,  $L_{z2} = 25,3$  мм,  $L_{a1} = 83$  мм,  $L_{a2} = 33,9$  мм,  $L_{\delta} = 0,44$  мм. Розрахувати амплітуду МРС  $F_{om}$ , що створює потік взаємної індукції, реактивну складову струму холостого ходу  $I_{or}$ , коефіцієнт насичення магнітного кола  $k_m$  і зубцевого шару  $k_z$ . Непостійність напруженості по довжині ділянки в ярмі статора урахувати коефіцієнтом  $\xi_1 = 0,33$  в ярмі ротора  $\xi_2 = 0,54$ . (Відповідь:  $F_{om} = 399,5$  А/м,  $I_{or} = 4,9$  А,  $k_m = 1,267$ ,  $k_z = 1,18$ ).

#### Задача 3.4.4

Трифазний асинхронний двигун с числом поліусів  $2p = 6$  підключений до мережі с частотою  $f_l = 50$  Гц. Ротор двигуна обертається з кутовою швидкістю  $\Omega = 100$  рад/с. Яка частота обертання МРС ротора відносно до ротора? Визначити кутову швидкість і частоту обер-

тання МРС обмотки статора і ротора відносно статора. (Відповідь:  $\Omega_1 = 104,7$  рад/с,  $\Omega_s = 4,7$  рад/с,  $n_{2p} = 45$  об/хв).

#### Задача 3.4.5

Число витків фази обмотки статора чотирьохполюсної асинхронного двигуна з фазним ротором  $W_1 = 96$ , ротора –  $W_2 = 40$ , обмоткові коефіцієнти  $k_{o1} = 0,897$  и  $k_{o2} = 0,96$  відповідно. Струми в обмотках статора  $I_1 = 15,5$  А, ротора  $I_2 = 32$  А. Визначити коефіцієнт приведення по струму, МРС статора і ротора. (Відповідь:  $k_I = 0,446$ ,  $F_{1m} = 901$  А/м,  $F_{2m} = 829,4$  А/м).

#### Задача 3.4.6.

Визначити номінальний момент  $M_{\text{ном}}$ , лінійний струм статора  $I$ , номінальний ККД  $\eta_{\text{ном}}$ , активну  $P$  і реактивну  $Q$  потужності, що потребляються з мережі шестиполюсним синхронним двигуном. Номінальні данні двигуна: номінальна потужність  $P_{\text{ном}} = 990$  кВт, номінальна напруга  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ, коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,8$ , відношення  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,2$ , синхронний опір  $X = 42$  Ом, номінальна частота обертання  $n_{\text{ном}} = 1000$  об/хв. (Відповідь:  $M_{\text{ном}} = 9,43$  кН·м,  $I = 141,4$  А,  $\eta_{\text{ном}} = 0,842$ ,  $P = 1176$  кВт,  $Q = 882$ кВАР).

#### Задача 3.4.7

Трифазний синхронний двигун навантажений постійним моментом, що дорівнює номінальному. В початковому режимі струм збудження машини дорівнював  $1,4 I_{30}$ , потім його збільшили і коефіцієнт потужності став дорівнювати  $0,9$  при струмі статора, що опереждає. Номінальні данні двигуна: номінальна потужність  $P_{\text{ном}} = 4000$  кВт, номінальна напруга  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ, номінальний струм  $I_{\text{ном}} = 443$  А, число полюсів  $2p = 2$  відношення  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,2$  (при струмі збудження  $I_3 = I_{30}$  ЕРС фази обмотки статора  $E_o = U_{\text{ф.ном}}$ ), синхронний опір  $X = 9,75$

Ом. Визначити максимальний момент  $M_{max1}$ , струм ротора  $I_2$  та побудувати кутові характеристики і векторні діаграми для двох режимів збудження. (Відповідь:  $M_{max1} = 16,5$  кН·м,  $I_2 = 426$  А).

#### Задача 3.4.8

Для трифазного синхронного двигуна побудувати сімейство кутових характеристик, що відповідають трьом значенням струму збудження:  $I_z = I_{z0}$ ,  $I_z = 1,3I_{z0}$  і  $I_z = 1,6I_{z0}$ . Відмітити на них робочі точки  $M = M_{ном}$ , потім по ним провести U-образну характеристику і указати на ній точку межі статичної стійкості. Розрахунок виконати графічним методом. Номінальні дані двигуна: номінальна потужність  $P_{ном} = 2500$  кВт, номінальна напруга  $U_{ном} = 6$  кВ, номінальний коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{ном} = 0,9$ , номінальна частота обертання  $n_{ном} = 3000$  об/хв синхронний опір  $X = 9,75$  Ом.

#### Задача 3.4.9

Знайти струм, коефіцієнт потужності, активну і реактивну потужність турбогенератора при струмі збудження, коли момент на валу  $M = 150$  кН·м. При розрахунку використовувати векторну діаграму. Паспортні дані генератора: номінальна потужність  $P_{ном} = 100000$  кВт, номінальна напруга  $U_{ном} = 15,75$  кВ, номінальний коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{ном} = 0,9$ , номінальна частота обертання  $n_{ном} = 3000$  об/хв синхронний опір  $X = 3,1$  Ом, в режимі холостого ходу при  $E_o = U_{ф,ном}$  струм збудження  $I_{z0} = 294$  А. (Відповідь:  $I = 2,42$  А,  $\cos\varphi = 0,715$ ,  $P = 47,2$  МВт,  $Q = 46,2$  МВАР).

#### Задача 3.4.10

Трифазний генератор, що розвиває активну потужність  $P = 35 \cdot 10$  кВт, підключений до шин станції з напругою  $U_{ном} = 10,5$  кВ. Синх-



ронний опір  $X = 3,2$  Ом, синхронна частота обертання ротора 3000 об/хв. Зміною струму збудження коефіцієнт потужності спочатку встановлений рівним одиниці, а потім 0,7 при індуктивному характері струму статора. Побудувати кутові характеристики і відмітити на них точки, що відповідають заданим режимам. Побудувати векторні діаграми генератора. Визначити реактивну потужність, що віддається до мережі. (Відповідь:  $Q = 35,6$  МВАР).

## **4. ЕКЗАМІНАЦІЙНІ ЗАПИТАННЯ З КУРСУ ОСНОВ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

4.1. Поняття та обґрунтування формули магніторушійної сили (МРС) зосередженої котушки та розподіл МРС у просторі (зазорі).

4.2. Обґрунтування функцій розподілу та гармонійного складу МРС зосередженої котушки при змінному струмі живлення.

4.3. Обґрунтування способу отримання та гармонійного складу обертової МРС при двофазному електричному живленні.

4.4. Обґрунтування способу отримання та гармонійного складу обертової МРС при трифазному електричному живленні.

4.5. Обґрунтування способів поліпшення гармонійного складу МРС та виразів коефіцієнтів розподілу та скорочення кроку обмотки.

4.6. Типи та особливості трифазних обмоток змінного струму.

4.7. Визначення понять головного електромагнітного поля і складових поля розсіяння, принцип дії електромеханічних перетворювачів.

4.8. Обґрунтування метода розрахунку магнітного поля електромашини на основі поняття питомої провідності зазору машини, аналіз та облік впливу зубчатості на структуру та інтенсивність поля.

4.9. Визначення понять електромагнітних навантажень і параметрів електромашини, обґрунтування зв'язку потужності, електромагнітних навантажень і розмірів електромеханічного перетворювача.

4.10. Визначення режиму холостого руху КМПС та обґрунтування розподілу магнітного поля збудження у просторі.

4.11. Обґрунтування метода та порядку розрахунку магнітного кола, визначення поняття характеристики неробочого руху електромашини та коефіцієнта насичення магнітного кола.

4.12. Обґрунтування розподілу магнітного поля якоря та результуючого поля КМПС у просторі (зазорі).

4.13. Визначення поняття реакції якоря КМПС і аналіз впливу конструктивних чинників на розподіл магнітного поля машини (компенсаційна обмотка, зсув щіток ...)

4.14. Обґрунтування формули ЕРС КМПС, аналіз зубцових пульсацій ЕРС.

4.15. Обґрунтування формули електромагнітного моменту КМПС.

4.16. Обґрунтування рівнянь, основних режимів роботи, витрат енергії та прикладу енергетичної діаграми КМПС.

4.17. Аналіз типів та особливостей обмоток, призначення та будова колектора КМПС.

4.18. Обґрунтування та рішення рівняння ЕРС секції у режимі комутації КМПС, аналіз режимів комутації.

4.19. Обґрунтування способів поліпшення та експериментальної перевірки комутації КМПС.

4.20. Обґрунтування і аналіз характеристик генератора постійного струму незалежного збудження та обґрунтування поняття і використання характеристичного трикутника.

4.21. Аналіз умов та рівняння перехідного процесу самозбудження, обґрунтування особливостей характеристик генераторів паралельного та послідовного збудження.

4.22. Аналіз умов стійкої роботи генераторів постійного струму і особливостей генераторів змішаного збудження.

4.23. Аналіз умов вмикання у мережу та умов паралельної роботи генераторів постійного струму існуючих типів збудження.

4.24. Обґрунтування виразів і вигляду швидкісної та механічної характеристик двигуна постійного струму паралельного збудження.

4.25. Обґрунтування виразів і вигляду швидкісної та механічної характеристик двигуна послідовного збудження, аналіз особливостей двигуна послідовного збудження.

4.26. Обґрунтування умови стійкої роботи двигунів постійного струму і аналіз особливостей двигунів змішаного збудження.

4.27. Обґрунтування і аналіз способів регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.

4.28. Обґрунтування і аналіз способів пуску, вигляд та особливості пускових і робочих характеристик двигунів постійного струму.

4.29. Обґрунтування принципу дії та формули ЕРС обмотки трансформатора.

4.30. Аналіз режимів неробочого руху і навантаження та обґрунтування рівнянь МРС і струмів обмоток трансформатора.

4.31. Обґрунтування особливостей гармонічного складу, виразів активної і реактивної частин та діючого значення струму неробочого руху трансформатора.

4.32. Обґрунтування системи рівнянь трансформатора у диференціальній і комплексній формі, приведення вторинної обмотки до первинної.

4.33. Обґрунтування можливості заміни трансформатора заступною схемою.

4.34. Аналіз заступних схем та векторних діаграм режимів неробочого руху, навантаження та короткого замикання трансформатора.

4.35. Обґрунтування способів експериментального визначення параметрів трансформатора.

4.36. Аналіз особливостей конструкцій магнітопроводів та електромагнітних процесів одно і трифазних трансформаторів.

4.37. Аналіз конструкцій, схем і груп з'єднань та ємнісного захисту обмоток одно і трифазних трансформаторів.

4.38. Аналіз впливу схеми з'єднань на гармонічний склад намагнічувального струму і магнітного потоку.

4.39. Обґрунтування практичної формули зміни вторинної напруги та вигляду зовнішніх характеристик трансформатора під навантаженням.

4.40. Аналіз умов паралельної роботи трансформаторів під навантаженням і можливих наслідків їх невиконання.

4.41. Обґрунтування енергетичної діаграми, практичного виразу та умови максимуму ККД трансформатора.

4.42. Методи розрахунку та аналіз особливостей несиметричних режимів роботи трифазних трансформаторів у залежності від схем з'єднання обмоток.

4.43. Аналіз впливу схеми з'єднань обмоток і типа конструкції магнітопроводу на додаткові втрати від третьої гармоніки намагнічувального струму та струму нульової послідовності несиметричного режиму навантаження трансформатора.

4.44. Визначення рівнянь електромагнітного процесу та аналіз особливостей триобмоткового трансформатора.

4.45. Визначення рівнянь електромагнітного процесу та аналіз особливостей автотрансформатора.

4.46. Аналіз та вирішення рівняння перехідного режиму короткого замикання трансформатора, облік можливих наслідків.

4.47. Способи регулювання напруги та регульовані трансформатори.

4.48. Типи та особливості перетворювальних трансформаторів.

4.49. Аналіз та вирішення рівняння перехідного режиму вмикання трансформатора під навантаження, облік можливих наслідків.

4.50. Класифікації типів та аналіз конструкцій електричних машин і трансформаторів по ступені захисту від навколишнього середовища, аналіз способів і конструкцій елементів систем їх охолодження.

4.51. Визначення метода розрахунку, аналіз особливостей розподілу температурного поля, засоби діагностики температури і температурного захисту електричних машин і трансформаторів.

4.52. Обґрунтування аналітичних виразів ЕРС витка, котушки, фази машини змінного струму.

4.53. Визначення параметрів електричних машин (ЕМ) змінного струму та обґрунтування виразу головної індуктивності фази.

4.54. Визначення режимів ідеального неробочого руху (НР), реального НР, навантаження та обґрунтування принципу дії АМ, поняття ковзання та залежності струму ротора та параметрів від ковзання.

4.55. Фізичний процес роботи, обґрунтування рівнянь та векторні діаграми магніторушійних сил (МРС) та струмів АМ.

4.56. Обґрунтування рівнянь та векторних діаграм первинного та вторинного електричних кіл АМ.

4.57. Аналіз режиму НР, обґрунтування векторної діаграми НР та зв'язку ЕРС взаємної індукції з намагнічувальним струмом АМ, складові струму НР АМ.

4.58. Енергетична діаграма режиму двигуна АМ та обґрунтування загального аналітичного виразу електромагнітного моменту.

4.59. Фізичний процес електромеханічного перетворення енергії в АМ, обґрунтування зв'язку електромеханічної потужності і потужності електричних втрат ротора.

4.60. Обґрунтування можливості заміщення обертового ротора АМ нерухомим ротором.

4.61. Обґрунтування рівнянь та загальної векторної діаграми режиму АД у приведеному вигляді.

4.62. Обґрунтування вигляду та параметрів Т і Г – образних заступних схем АМ, аналітичне та графічне тлумачення комплексного коефіцієнта перетворення заступних схем.

4.63. Визначення практичного виразу залежності електромагнітного моменту АМ від параметрів, електромеханічні характеристики АМ.

4.64. Визначення особливостей, обґрунтування енергетичної і векторної діаграми генераторного режиму АМ.

4.65. Визначення особливостей, обґрунтування енергетичної і векторної діаграми режиму електромагнітного гальма.

4.66. Обґрунтування режиму, заступної схеми, параметрів та виразу ЕМ режиму короткого замикання (КЗ) АМ.

4.67. Визначення зубцевих гармонік електромагнітного поля, зубцевої ЕРС та додаткові ЕМ, обґрунтування засобів боротьби з ними.

4.68. Обґрунтування відміни статичної і динамічної механічної характеристик АД, асинхронні та синхронні додаткові моменти, засоби їх обмеження.

4.69. Визначення та обґрунтування призначення і використання колової діаграми АМ.

4.70. Побудова колової діаграми по експериментальним результатам дослідів НР і КЗ.

4.71. Обґрунтування залежностей параметрів кола ротора АМ від частоти, різновиди АД з поліпшеними пусковими властивостями.

4.72. Аналіз методів розрахунку та вигляду робочих і пускових характеристик АД, визначення засобу обліку зміни параметрів ротора при пуску АД.

4.73. Аналіз вимог до пускових характеристик АД та засобів пуску потужних АД.

4.74. Обґрунтування засобів та аналіз електромеханічних систем регулювання частоти обертання короткозамкнених АД.

4.75. Обґрунтування засобів та аналіз електромеханічних систем регулювання частоти обертання АД з фазним ротором.

4.76. Аналіз різновидів СМ по типу живлення та конструкції системи збудження.

4.77. Обґрунтування форми кривої магнітного поля та виразу магнітного потоку збудження явнополюсної СМ.

4.78. Обґрунтування форми кривої МРС і індукції магнітного поля неявнополюсної СМ.

4.79. Аналіз напрямку магнітного поля реакції якоря СМ у залежності від типу навантаження.

4.80. Обґрунтування методу двох реакцій та понять продовжного та поперечного струмів якоря.

4.81. Аналіз розподілу індукції та обґрунтування коефіцієнтів форми кривої поля СМ по продовжній та поперечній осі.

4.82. Визначення індуктивних опорів реакції якоря та результуючого потоку СМ, обґрунтування векторної діаграми ЕРС.

4.83. Обґрунтування параметрів, рівняння напруги та векторної діаграми явно полюсних СГ.

4.84. Обґрунтування параметрів, рівняння напруги та векторної діаграми неявнополюсного СГ.

4.85. Обґрунтування засобу експериментального визначення синхронного індуктивного опору СМ.

4.86. Обґрунтування вигляду зовнішньої та регулювальної характеристик СМ.

4.87. Обґрунтування засобу експериментального визначення індуктивного опору розсіяння СМ.

4.88. Обґрунтування засобу визначення струму збудження СМ з обліком насичення магнітного кола.

4.89. Визначення засобів та умов вмикання СМ на паралельну роботу, призначення опору та електрична схема погашення поля.



4.90. Визначення та обґрунтування синхронних режимів та спрощених векторних діаграм паралельної роботи СМ з електричною мережею.

4.91. Обґрунтування виразу електромагнітного моменту СМ.

4.92. Визначення кутових характеристик активної і реактивної потужності та понять статичної і динамічної стійкості СМ.

4.93. Аналіз особливостей, переваг і недоліків та обґрунтування векторної діаграми синхронного двигуна (СД).

4.94. Обґрунтування особливостей та кутових характеристик активної і реактивної потужності синхронної реактивної машини.

4.95. Аналіз засобів пуску та вигляду пускової характеристики СД, призначення демпферної обмотки СМ у режимах генератора та двигуна.

4.96. Обґрунтування відображення режимів роботи СМ на V-образних характеристиках СМ.

4.97. Аналіз засобів розрахунку перехідних процесів електричних машин та особливостей перехідних режимів АМ.

4.98. Аналіз фізичного процесу та обґрунтування кривих зміни струмів електричних кіл СМ при перехідному процесі КЗ.

4.99. Обґрунтування вигляду заступної схеми та параметрів СМ у залежності від стадії та типу перехідного режиму КЗ.

## 5. РЕЙТИНГОВА СИСТЕМА БАЛІВ ПО ДИСЦИПЛІНІ "ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ"

Оцінювання знань студентів здійснюється за рейтинговою системою балів. Для забезпечення конкретної оцінки засвоєння студентом теоретичної частини курсу, максимальна кількість залікових балів за кожний модуль приймається 100 з наступним перерахунком в загальну оцінку через коефіцієнт вагомості модуля. Оцінка виставляється у відповідності із приведеною шкалою (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Шкала оцінок

За шкалою ECTS	За національною шкалою	За шкалою навчального закладу (як приклад)
A	5 (відмінно)	90-100
BC	4 (добре)	75-89
DE	3 (задовільно)	60-74
FX	2 (незадовільно) з можливістю повторного складання	35-59
F	2 (незадовільно) з обов'язковим повтор- ним курсом	1-34

Вивчення дисципліни "Електричні машини" передбачає регулярне проведення контрольних заходів, успішне виконання яких у відведений термін надає семестрову рейтингову оцінку. Вказані заходи включають до себе проведення поточного, модульного та підсумкового контролю. Сума балів набрана студентом під час виконання всіх видів робіт за модуль сумується. За всі контрольні заходи протягом семестру з дисципліни студент може отримати до 100 балів.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2010. 366 с.
2. Белікова Л. Я., Шевченко В.П. Електричні машини : навч. посіб. Одеса : Наука і техніка, 2012. 478 с.
3. Електричні машини : підручник / Б. Т. Кононов та ін.; за ред. Б.Т. Кононова. Харків : ХУПС, 2015. 493 с.
4. Електричні машини і апарати : навч. посіб. / Ю. М. Куценко та ін. Київ : Аграрна освіта, 2013. 449 с.
5. Заблодський М. М., Чуєнко Р. М., Васюк В. В. Електричні машини змінного струму : навч. посіб. Київ : ЦП Компрінт, 2018. 514 с.
6. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини : підручник. Київ : Знання, 2009. 399 с.
7. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / за ред. В. І. Мілих. Київ : Каравела, 2018. 454 с.
8. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д. В. Циценков та ін. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 408 с.
9. Яцун М. А. Електричні машини : навч. посіб. 2-ге вид., стер. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2004. 440 с.
10. Яцун М. А. Електричні машини. Львів : Львівська політехніка, 2001. 428 с.

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ЕМ – електричні машини;
- КМПС – колекторні машини постійного струму;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- МРС – магніторушійна сила;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- СНР – струм неробочого руху
- АМ – асинхронна машина;
- СМ – синхронна машина;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- АД – асинхронний двигун;
- СГ – синхронний генератор;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- ЕМ – електрична машина;
- НР – неробочий рух;
- МРС – магніторушійна сила;
- КЗ – коротке замикання;
- СД – синхронний двигун

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	3
<b>1. КОЛЕКТОРНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ</b> .....	4
1.1. Теоретичні відомості.....	4
1.2. Приклади рішення типових задач.....	6
1.3. Завдання до контрольної роботи № 1.....	8
1.4. Завдання для самостійної роботи.....	15
<b>2. ТРАНСФОРМАТОРИ</b> .....	18
2.1. Теоретичні відомості.....	18
2.2. Приклади рішення типових задач.....	19
2.3. Завдання до контрольної роботи № 2.....	22
2.4. Завдання для самостійної роботи.....	29
<b>3. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ</b> .....	32
3.1. Теоретичні відомості.....	32
3.2. Приклади рішення типових задач.....	35
3.3. Завдання до контрольної роботи № 3.....	37
3.4. Завдання для самостійної роботи.....	45
<b>4. ЕКЗАМІНАЦІЙНІ ЗАПИТАННЯ З КУРСУ ОСНОВ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН</b> .....	50
<b>5. РЕЙТИНГОВА СИСТЕМА БАЛІВ ПО ДИСЦІПЛІНІ "ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ"</b> .....	58
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	59
<b>СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b> .....	60

Навчальне видання

## **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ**

Методичні рекомендації

Укладачі: **Ставинський Андрій Андрійович**

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_  
Тираж 20 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.