

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ  
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ЩОДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ  
**„ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ”**  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ  
ЗА НАПРЯМАМИ: 6.050702 – «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»,  
6.050701 – «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ»  
(У ТОМУ ЧИСЛІ ДЛЯ СКОРОЧЕНОГО ТЕРМІНУ НАВЧАННЯ)

КРЕМЕНЧУК 2012

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни „Електричні машини” для студентів денної та заочної форм навчання за напрямами: 6.050702 – «Електромеханіка», 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології» (у тому числі для скороченого терміну навчання)

Укладачі: к.т.н., професор В. О. Некрасов,  
к.т.н., доцент А. В. Некрасов,  
асист. Р. М. Донченко,  
асист. В. В. Ромашина

Рецензент д.т.н., с.н.с. А. П. Ращепкін.

Кафедра електричних машин та апаратів

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Голова методичної ради \_\_\_\_\_ проф. В. В. Костін

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Перелік практичних робіт.....	5
Практична робота № 1 Трансформатори .....	5
Практична робота № 2 Асинхронні машини.....	16
Практична робота № 3 Синхронні машини.....	26
Практична робота № 4 Машини постійного струму .....	36
Список літератури .....	47

## ВСТУП

Курс "Електричні машини" призначений для оволодіння теоретичними та практичними знаннями процесів електромеханічного перетворення енергії, загальними принципами роботи, функціональної та конструкторської побудови електричних машин.

Знання методик та навички розрахунку параметрів ЕМ дозволять майбутньому інженерові професійно підійти до вибору електричних машин з урахуванням дійсних режимів, у яких вони працюють.

Методичні вказівки складаються із чотирьох розділів: «Трансформатори», «Асинхронні машини», «Синхронні машини», «Машини постійного струму».

Дисципліна «Електричні машини» базується на вивченні курсу «Теоретичні основи електротехніки», частини курсу «Фізика» (розділи «Електрика» і «Магнетизм»), курсу «Вищої математики», курсу «Інженерної графіки». Матеріали дисципліни «Електричні машини» використовуються у дисциплінах: «Теорія електропривода», «Теплові розрахунки в електричних машинах і апаратах», «Основи автоматизованого проектування електричних машин і апаратів», «Випробування, експлуатація та ремонт електричних машин».

Для перевірки знань після кожного розділу наведено питання, на які студент повинен дати правильні відповіді.

У результаті виконання практичних робіт з курсу «Електричні машини» студент повинен уміти вибрати необхідну електричну машину, урахувавши особливості її роботи та особливості електричної схеми, у якій вона застосовується; розраховувати основні параметри електричних машин при роботі останніх у сталих і перехідних режимах; будувати характеристики згідно з розрахунковими й експериментальними даними.

# ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

## Практична робота № 1

### Тема: Трансформатори

**Мета:** розширення і закріплення теоретичних знань з розділу трансформатори, а також вивчення сучасних методів розрахунків та проектування силових трансформаторів.

### Короткі теоретичні відомості

Трансформатор — це статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки, і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінних струмів і напруги в одну або декілька інших систем змінних струмів або напруги, тієї ж частоти.

Первинна обмотка трансформатора із числом витків  $\omega_1$  — обмотка трансформатора, що вмикається в електричну мережу змінного струму.

Вторинна обмотка трансформатора із числом витків  $\omega_2$  — обмотка трансформатора, до якої підключають споживачів електричної енергії.

Номинальні дані трансформатора: повна потужність  $S_n$ ; лінійна напруга первинної  $U_{1лн}$  і вторинної  $U_{2лн}$  обмоток і струми  $I_{1н}$  і  $I_{2н}$  у них; ККД  $\eta_n$ ; частота мережі  $f$ , їх наводять на заводському щитку (паспорті). Там же само зазначають значення струму холостого ходу  $I_0$  в первинній обмотці у відсотках від  $I_{1лн}$  і напругу короткого замикання  $u_k$  у відсотках від  $U_{1лн}$ . Для багатофазних трансформаторів вказують схеми з'єднання обмоток і групу з'єднання, наприклад, для трифазного двообмоткового трансформатора стандартизованими є  $Y/Y-0$  або  $Y/\Delta-11$ , де цифра означає групу з'єднання.

Під номінальною потужністю розуміють повну потужність трансформатора:

для однофазних

$$S_n = U_{1n} I_{1n} = U_{1лн} I_{1лн},$$

для трифазних

$$S_n = 3U_{1n} I_{1n} = \sqrt{3}U_{1лн} I_{1лн},$$

де  $U_{1n}$  і  $I_{1n}$  — фазна напруга і струм у первинній обмотці.

Номінальна вторинна напруга — ця напруга на затискачах вторинної обмотки в режимі холостого ходу трансформатора (при  $I_2 = 0$ )

$$U_{2н} = U_{20}.$$

За номінальний вторинний струм умовно беруть струм, розрахований за номінальною потужністю при номінальній вторинній напрузі.

Для однофазного трансформатора

$$I_{2н} = S_n / U_{2н};$$

для трифазного трансформатора

$$I_{2лн} = S_n / \sqrt{3}U_{2н} - \text{лінійний струм};$$

$$I_{2н} = S_n / 3U_{2н} - \text{фазний струм}.$$

ЕРС, індукована в первинній і вторинній обмотках основним (головним) магнітним потоком, що замикається по магнітопроводу

$$\begin{cases} e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2}E_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \\ e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2}E_2 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \end{cases}$$

де  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  — основний магнітний потік.

Діючі ЕРС, що індукуються основним магнітним потоком

$$\begin{cases} E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi_m; \\ E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_m. \end{cases}$$

Коефіцієнт трансформації

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cong \frac{U_{1н}}{U_{20}} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Коефіцієнт завантаження (навантаження) трансформатора

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$$

Втрата напруги в трансформаторі:

а) у відсотках від номінальної

$$\Delta u = \beta(u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{сп} \sin \varphi_2) = \beta u_{\kappa} \cos(\varphi_{\kappa} - \varphi_2);$$

б) у відносних одиницях

$$\Delta u^* = \frac{\Delta u}{100} = \frac{1}{100} \beta u_{\kappa} \cos(\varphi_{\kappa} - \varphi_2),$$

де  $\cos \varphi_2$  — коефіцієнт потужності приймача.

Зовнішня характеристика  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_{1н} = const$ ,  $f = const$  і  $\cos \varphi_2 = const$

$$U_2 = U_{2н}(1 - \Delta u),$$

або у відносних одиницях

$$U_{2*} = \frac{U_2}{U_{2н}} = (1 - \Delta u).$$

Потужність втрат у режимі холостого ходу ( $I_2 = 0$ ) при  $U_{1н} = const$  і  $f = const$

а) в однофазному трансформаторі

$$P_0 = U_{1н} I_0 \cos \varphi_0 = I_0^2 (R_1 + R_0) \cong I_0^2 R_0;$$

б) у трифазному трансформаторі

$$P_0 = 3U_{1н} I_0 \cos \varphi_0 = 3I_0^2 (R_1 + R_0) \cong 3I_0^2 R_0.$$

Потужність втрат у режимі короткого замикання ( $Z_n = 0$ ) при  $I_{1н} = const$  і  $f = const$ :

а) в однофазному трансформаторі

$$P_{\kappa} = U_{1\kappa} I_{1н} \cos \varphi_{\kappa} = I_{1н}^2 R_{\kappa};$$

б) у трифазному трансформаторі

$$P_{\kappa} = 3U_{1\kappa} I_{1н} \cos \varphi_{\kappa} = 3I_{1н}^2 R_{\kappa}.$$

Потужність втрат у трансформаторі

$$\sum P_{\sigma} = P_0 + \beta^2 R_{\kappa}.$$

ККД трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}.$$

Максимальне значення ККД

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2P_0}{\beta_{\text{opt}} S_n \cos \varphi_2 + 2P_0},$$

де  $\beta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}$  — оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора.

### Завдання до теми

1.1 Трифазний трансформатор ТС-180/10 увімкнений у мережу напругою 10000 В. Користуючись даними, зазначеними в паспорті (див. табл. 1.1), розрахувати: фазні напруги, якщо група з'єднання трансформатора Y/Δ-11; фазний і лінійний коефіцієнт трансформації; номінальні струми первинної та вторинної обмоток; активні опори обмоток, якщо при короткому замиканні трансформатора потужності первинної та вторинної обмоток рівні; напругу вторинної обмотки при активно-індуктивному навантаженні, що становить 75 % від номінального ( $\beta=0,75$ ) і  $\cos \varphi_2 = 0,9$ ; ККД при навантаженні, що становить 50 % ( $\beta=0,5$ ) від номінального і  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

Таблиця 1.1

Тип трансформатора	$S_n$ , кВА	$U_{1н}$ , кВ	$U_{2н}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$P_{кз}$ , кВт	$U_{кз}$ , %	$I_0$ , %
ОМ-6667/35	6667	35	10	17	53,5	8	3
ТС-180/10	180	10	0,525	1,6	3,0	5,5	4

#### Розв'язок

У трансформатора ТС-180/10 первинна обмотка з'єднана в зірку, а вторинна – у трикутник, тому фазні напруги дорівнюють:

$$U_{1\phi} = U_{1л} / \sqrt{3} = 10000 / 1,73 = 5780 \text{ В};$$

$$U_{2\phi} = U_{2н} = 525 \text{ В}.$$



Фазний і лінійний коефіцієнти трансформації відповідно:

$$K_{\phi} = U_{1\phi} / U_{1л} = 5780 / 525 \approx 11;$$

$$K_{л} = U_{1н} / U_{1л} = 10000 / 525 \approx 19.$$

Номинальні струми первинної та вторинної обмоток визначимо з формули номінальної потужності трансформатора:

$$S_{н} = \sqrt{3} U_{2н} I_{2н} = \sqrt{3} U_{1н} I_{1н}.$$

Звідки

$$I_{1н} = S_{н} / (\sqrt{3} U_{1н}) = 180 / (1,73 \cdot 10) = 10,4 \text{ A};$$

$$I_{2н} = S_{н} / (\sqrt{3} U_{2н}) = 180 / (1,73 \cdot 0,525) = 198 \text{ A}.$$

Знаходимо активні опори обмоток  $r_1$  і  $r_2$  з урахуванням того, що в кожній обмотці трансформатора по три фази і струм короткого замикання  $I_{к}$  дорівнює номінальному струму  $I_{1н}$ :

$$r_1 = \frac{P_{к}}{2 \cdot 3 \cdot I_{1к}^2} = \frac{P_{к}}{2 \cdot 3 \cdot I_{1н}^2} = \frac{3000}{6 \cdot 10,4^2} = 4,62 \text{ Ом};$$

$$r_2 = \frac{P_{к}}{2 \cdot 3 \cdot I_{2н}^2} = \frac{3000}{6 \cdot 114,4^2} = 0,038 \text{ Ом}$$

де  $I_{2н\phi} = I_{2н} / \sqrt{3} = 198 / 1,73 = 114,4 \text{ A}$

Напругу на вторинній обмотці навантаженого трифазного трансформатора визначають:

$$\Delta U = \beta (U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2) = 0,75 (1,67 \cdot 0,9 + 5,24 \cdot 0,436) = 2,84 \%$$

де  $U_a = (P_{к} / S_{н}) 100 = (3 / 180) 100 = 1,67 \%$ ;

$$U_p = \sqrt{U_{к}^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,67^2} = 5,24 \%.$$

У свою чергу,  $S_{н}$  – це потужність усіх трьох фаз, а  $P_{к}$  – потужність втрат у трьох фазах, зазначених у паспорті.

Отже,

$$U_2 = U_{2н} (1 - \Delta U / 100) = 525 (1 - 0,0284) = 510 \text{ В}.$$

ККД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \left( \frac{P_0 + \beta^2 P_{к}}{\beta S_{н} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{к}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{1,6 + 0,5^2 \cdot 3}{0,5 \cdot 180 \cdot 0,8 + 1,6 + 0,5^2 \cdot 3} \right) \cdot 100 = 97 \%.$$

1.2 В однофазному трансформаторі визначити: ЕРС, індуковану в одному витку; ЕРС первинної та вторинної обмоток, коефіцієнт трансформації, якщо площа перерізу сталі осердя,  $S_{cm} = 8\text{см}^2$ , максимальна магнітна індукція в ньому  $B_m = 1\text{Тл}$ , частота мережі  $f = 50\text{Гц}$ , число витків  $w_1 = 800$  і  $w_2 = 100$ .

*Розв'язок*

Максимальний магнітний потік у осерді:

$$\Phi_m = B_m S_{cm} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Діючи значення ЕРС, індукованої в одному витку:

$$E_w = 4,44 f \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 0,178 \text{ В}.$$

Діючи значення ЕРС первинної та вторинної обмоток відповідно:

$$E_1 = E_w w_1 = 0,178 \cdot 800 = 142,4 \text{ В};$$

$$E_2 = E_w w_2 = 0,178 \cdot 100 = 17,8 \text{ В}.$$

Коефіцієнт трансформації

$$K_n = w_1/w_2 = E_1/E_2 = 800/100 = 8.$$

1.3 При випробуванні однофазного споживача змінного струму за схемою (рис. 1.1) увімкнути такі прилади: ватметр ( $U_{кВ} = 100\text{В}$ ,  $I_{кВ} = 5\text{А}$ ,  $\alpha_{кВ} = 100\text{В}$ ), вольтметр ( $U_{кВ} = 100\text{В}$ ) та амперметр ( $I_{кА} = 5\text{А}$ ). Прилади ввімкнені через вимірювальний трансформатор напруги з коефіцієнтом трансформації  $K_U = 500/100$  і трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації  $K_I = 30/5$ . При випробуванні вольтметр показав  $U = 76\text{В}$ , амперметр  $I = 4,5\text{А}$ , стрілки ватметра відхилилися на  $\alpha_w = 64$  поділки шкали.

За показаннями приладів знайти напругу мережі  $U_1$ , струм навантаження  $I_{нав}$  і споживану потужність.

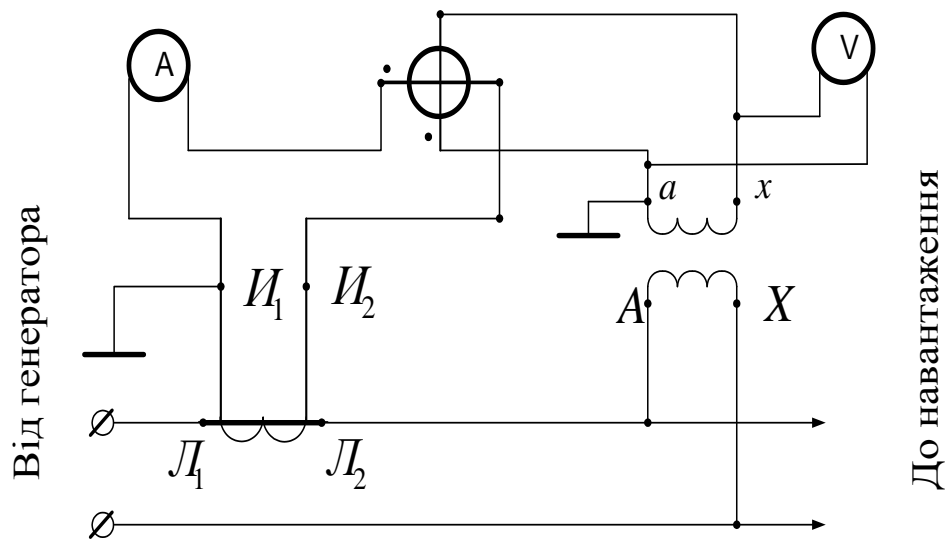


Рисунок 1.1

Розв'язок

Напряга мережі

$$U_1 = K_U U = 5 \cdot 76 = 380 \text{ В.}$$

Струм навантаження

$$I_{наг} = K_I I = 4,5 \cdot 6 = 27 \text{ А.}$$

Споживана потужність з урахуванням трансформаторів напруги та струму

$$P = \alpha_w C',$$

де  $C' = CK_U K_I = 5 \cdot 5 \cdot 6 = 150 \text{ Вт/под.}$

У свою чергу,

$$C = \frac{U_{кВ} I_{кВ}}{\alpha_{кВ}} = \frac{100 \cdot 5}{100} = 5 \text{ Вт/под.}$$

У кінцевому підсумку маємо  $P = 9,6 \text{ кВт.}$

1.4 Однофазний трансформатор ОМ-6667/35 працює як знижувальний. Користуючись його технічними даними, наведеними в табл. 1.1, розрахувати: коефіцієнт трансформації  $n$ ; номінальні струми первинної та вторинної обмоток  $I_{1н}, I_{2н}$ ; напругу на вторинній обмотці  $U_2$  при активно-індуктивному навантаженні, що становить 50 % ( $\beta=0,5$ ) від номінальної та  $\cos \varphi_2 = 0,8$ ; ККД

при  $\cos \varphi_2 = 0,9$  і навантаженні, що складає 75% ( $\beta=0,75$ ) від номінального; річний ККД, якщо з повним навантаженням при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  трансформатор працює 7000 год.

1.5 Два однофазні трансформатори з номінальними напругами  $U_{1н} = 3000\text{ В}$  і  $U_{2н} = 400\text{ В}$  повинні підключатися до спільних шин на паралельну роботу. Маркування виводів вторинних обмоток відсутнє і правильність паралельного ввімкнення перевіряється за допомогою включення вольтметра. Що покаже вольтметр, якщо трансформатори ввімкнені за схемою, показаною на рис. 1.2.

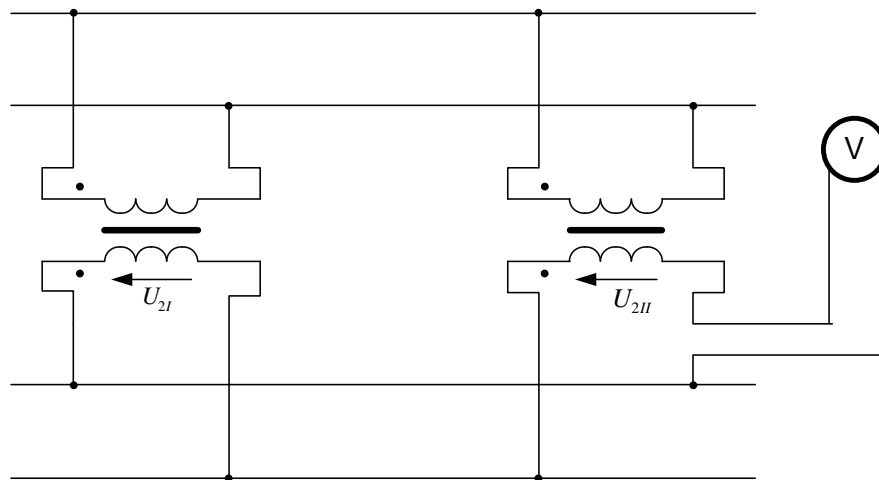


Рисунок 1.2

1.6 Два однофазні трансформатори встановлені на паралельну роботу. Обидва мають однакові номінальні потужності  $S_n = 50\text{ кВА}$  та напруги первинних і вторинних обмоток, але різні напруги короткого замикання  $U_{1к} = 5\%$ ,  $U_{2к} = 7\%$ .

Пояснити за допомогою зовнішніх характеристик трансформаторів, як розподілиться навантаження, потужність якого  $S_{нав} = 100\text{ кВА}$ , між трансформаторами.

1.7 Для обмеження пускового струму трифазний асинхронний короткозамкнений двигун вмикають у мережу за допомогою автотрансформатора (рис. 1.3). Знайти струм в обмотці вищої напруги автотрансформатора при пуску асинхронного двигуна, якщо без автотрансформатора  $I_n = 960\text{ А}$  і коефіцієнт трансформації автотрансформатора

$$K = \omega_1 / \omega_2 = 2.$$

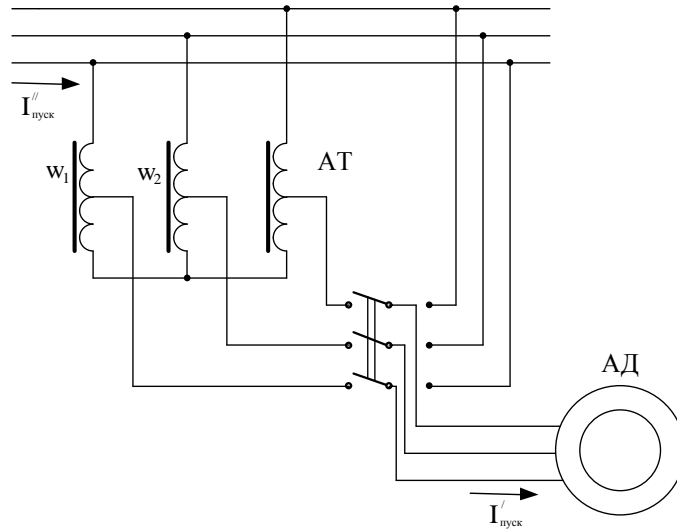


Рисунок 1.3

1.8 Побудувати векторну діаграму роботи в номінальному режимі однофазного трансформатора, якщо відомі: номінальна напруга вторинної обмотки  $U_{2н} = 120 В$ , номінальний струм вторинної обмотки  $I_{2н} = 20 А$  при активно-індуктивному навантаженні  $r_{наг} = 4,8 Ом$ ,  $x_{наг} = 3,6 Ом$ , опір обмоток трансформатора:  $r_1 = 0,5 Ом$ ,  $x_1 = 2 Ом$ ;  $r_2 = 0,35 Ом$ ,  $x_2 = 1 Ом$ ; відношення чисел витків  $K = \omega_1 / \omega_2 = 1,4$ , струм  $I_0 = 1,2 А$  і кут втрат у сталі  $\alpha = 5 \%$ . Визначити на діаграмі  $I_{1н}$ ,  $U_{1н}$ ,  $\phi_1$  і пояснити, чому зі зростанням навантаження у вторинній обмотці струм  $I_{1н}$  у первинній обмотці збільшується?

1.9 Є трифазний трансформатор з наступними даними:  $S_n = 50 кВА$ ,  $U_{1н} = 3000 В$ ,  $U_{2н} = 230 В$ ,  $P_k = 1325 Вт$ ,  $U_{кз} = 5,5 \%$ ,  $f = 50 Гц$ , група з'єднання  $Y/Y-12$ .

Скласти спрощену схему трансформатора в режимі короткого замикання і визначити значення всіх елементів схеми, а також активні та індуктивні опори обох обмоток трансформатора, якщо вважати, що опори первинної обмотки рівні наведеним опорам вторинної обмотки, тобто  $r_1 = r'_2$ ,  $x_1 = x'_2$ .

1.10 Порівняти у скільки разів збільшиться активна площа перерізу міді обмоток при заміні однофазного автотрансформатора (рис. 1.4, а)

трансформатором (рис. 1.4, б) при  $U_2 = 200\text{ В}$  і  $U_2 = 100\text{ В}$ , якщо напруга мережі  $U_1 = 220\text{ В}$ , обмотка, увімкнена в мережу (а також первинна обмотка трансформатора), має число витків  $w_1 = 300$ , струм споживача  $I_2$  при активному навантаженні у всіх випадках дорівнює  $10\text{ А}$ , допустима щільність струму  $j = 2\text{ А/мм}^2$ . У розрахунках струмом холостого ходу знехтувати.

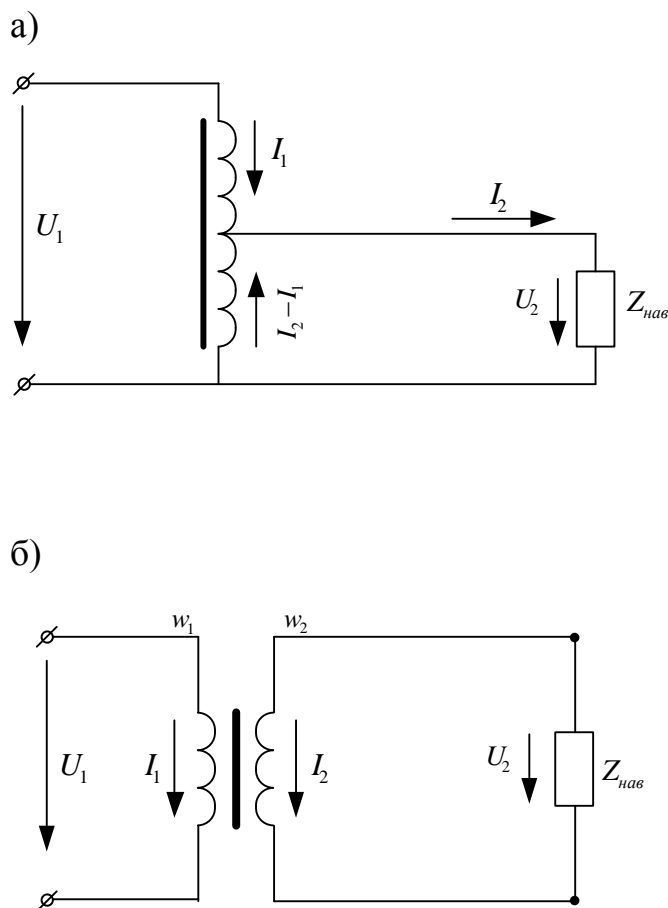


Рисунок 1.4

1.11 Номінальна потужність однофазного трансформатора  $S_H = 100\text{ кВ}\cdot\text{А}$ , номінальна напруга первинної обмотки  $U_{1H} = 6\text{ кВ}$ ; номінальна напруга вторинної обмотки  $U_{2H} = 400\text{ В}$ ; напруга на один виток  $U_B = 5\text{ В}$ ; індукція в осерді  $B = 1,4\text{ Тл}$ ; коефіцієнт заповнення сталі осердя  $K_{ст} = 0,93$ ; густина струму в обмотках  $j = 4\text{ А/мм}^2$ ; частота мережі живлення  $f = 50\text{ Гц}$ .

Визначити: коефіцієнт трансформації  $K$ , кількість витків первинної та вторинної обмоток  $w_1$  і  $w_2$ , площу поперечних перерізів провідників первинної й вторинної обмоток  $q_1$  і  $q_2$ , загальну площу поперечного перерізу

магнітопроводу осердя  $Q_m$ .

1.12 Трифазний трансформатор із групою з'єднання обмоток  $\Delta/Y$  - 11 має такі параметри:  $S_H=630$  кВА,  $U_{1H}/U_{2H}=21000/400$  В, напругу на один виток  $U_B=962$ В/вит, напругу КЗ  $u_{1K}=4,5\%$ , потужність втрат КЗ  $P_K=9,25$  кВт, струм ХХ  $I_0=0,02I_{2H}$ ,  $P_0=1,49$  кВт, середню довжину витка та площу поперечного перерізу провідника на стороні високої напруги  $L_1=1,022$  м,  $q_1=4,9$  мм<sup>2</sup>, на стороні низької напруги  $L_2=0,734$  м,  $q_2=404,5$  мм<sup>2</sup>. Визначити активні опори обмоток трансформатора  $R_1$  і  $R_2$  при температурі  $75^\circ\text{C}$ , якщо питомий опір проводу при цій температурі  $\rho_{75}=0,0346$  мкОм·м; втрати в сталі  $P_{ст}$  з урахуванням втрат в обмотках при ХХ; номінальні струми  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$ ; магнітний потік  $\Phi$ ; максимальний ККД  $\eta_{max}$ .

1.13 Однофазний трансформатор має такі параметри:  $U_{1H}=127$  В,  $U_{2H}=400$ В,  $I_{1H}=2,5$ А,  $U_{1K}=8$ В,  $P_K=17$ Вт, навантаження активно-індуктивне  $\cos\varphi_2=0,7$ . Знайти напругу  $U_2$  при номінальному навантаженні ( $\beta=1$ ).

1.14 Трансформатор зі схемою з'єднань  $Y/\Delta$  має напруги  $U_{1H}/U_{2H}=10,5/0,4$  кВ,  $P_K=0,78$  кВт,  $i_0=5\%$ ,  $u_K=4,5\%$ ,  $u_a=2,6\%$ ,  $f=50$  Гц,  $S_H=25$  кВ·А,  $P_0=0,14$  кВт. Визначити номінальні потужності на частотах 20, 40, 60, 100 Гц;  $S_{20}$ ,  $S_{40}$ ,  $S_{60}$ ,  $S_{80}$ ,  $S_{100}$ ; втрати при холостому ході на тих же частотах  $P_{20}$ ,  $P_{40}$ ,  $P_{60}$ ,  $P_{80}$ ,  $P_{100}$ ; ККД на тих же частотах при номінальному навантаженні та  $\cos\varphi_2=0,85$   $\eta_{20}$ ,  $\eta_{40}$ ,  $\eta_{60}$ ,  $\eta_{80}$ ,  $\eta_{100}$ .

1.15 Трифазний трансформатор має з'єднання обмоток  $Y/Y$  - 0,  $S_H=63$  кВ·А,  $U_{1H}/U_{2H}=5500/400$  В, відсоткова напруга КЗ  $u_{1K}=6\%$ , а його активна складова частина  $u_a=2,38\%$ . Визначити номінальні струми  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$ ; активні втрати в обмотках при номінальному навантаженні  $P_{ел}$ ; опори  $R_K$ ,  $X_K$ ; втрати в сталі  $P_{ст}$ ; якщо при номінальному навантаженні  $\cos\varphi_2=0,85$ ,  $\eta=94,5\%$ .

### Контрольні питання

1. Призначення і галузь застосування трансформаторів, основні визначення.
2. Конструкція і принцип дії однофазного трансформатора.

3. Для чого осердя трансформаторів складають із тонких листів електро-технічної сталі, ізолюваних між собою?
4. Приведений трансформатор, формули приведення.
5. Дослід холостого ходу трансформатора.
6. Дослід короткого замикання трансформатора.
7. Втрати і коефіцієнт корисної дії трансформатора.
8. За якої умови ККД трансформатора має максимальне значення?
9. Поясніть фізичний зміст групи з'єднань трифазних трансформаторів та як вони позначаються?
10. Автотрансформатор, схема, призначення, переваги, недоліки у порівнянні з трансформатором.

**Література:** [1, гл. 2; 2, гл. 2; 3, розд. 1; 4, мод. 2; 5, гл.5].

## **Практична робота № 2**

### **Тема: Асинхронні машини**

**Мета:** формування, систематизація, закріплення, розширення теоретичних і практичних знань з розділу асинхронні машини, розвиток навичок щодо самостійної роботи, опанування методики дослідження й аналізу поставленого завдання.

### **Короткі теоретичні відомості**

Асинхронна машина — це машина змінного струму, у якій в сталому режимі магнітне поле статора і ротор обертаються з різними кутовими швидкостями.

Конструктивне виконання: з короткозамкнутим і з фазним ротором (з контактними кільцями).

Режими роботи асинхронних машин: режим двигуна (основний), генераторний і гальмівні.

Номінальні (паспортні) дані двигуна: механічна потужність  $P_n$ , напруга обмотки статора  $U_{1n}$ , струм статора  $I_{1n}$ , частота мережі  $f$ , частота обертання ротора  $n_{2n}$ , ККД  $\eta_n$ , коефіцієнт потужності  $\cos \varphi_n$ , напруга між контактними



кільцями при розімкненій обмотці ротора  $U_{20} = E_2$  і номінальний струм в обмотці ротора  $I_{2n}$  — для АД з фазним ротором.

У каталогах на двигуни, крім того, зазначають кратність пускового струму  $I_{n*} = I_n / I_n$ , кратність пускового моменту  $M_{n*} = M_n / M_n$ , кратність максимального моменту (перевантажувальну здатність двигуна)  $M_{\max*} = M_{\max} / M_{n*}$ .

У паспортних даних АД зазвичай вказують два значення напруги, наприклад, 380/220 В. Менше значення напруги (220 В) — це фазна напруга обмотки статора. Якщо лінійна напруга мережі дорівнює цій напрузі, то обмотки статора необхідно з'єднати трикутником, якщо лінійна напруга мережі дорівнює більшому значенню  $U_{1n}$  (380 В), то обмотки статора з'єднують зіркою. Відповідно вказують і два значення лінійного струму  $I_{1n}$  при сполученні обмоток зіркою і трикутником.

Частота обертання магнітного поля

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

де  $f$  — частота напруги мережі;  $p$  — число пар полюсів машини.

При промисловій частоті  $f = 50$  Гц частота обертання магнітного поля визначається як  $n_1 = 3000/p$ .

Ковзання — це відносна різниця частот обертання або кутових швидкостей магнітного поля і ротора

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\omega_1},$$

де  $n_2$  — частота обертання ротора;  $\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}$  і  $\omega_2 = \frac{\pi n_2}{30}$  — кутові швидкості обертання магнітного поля і ротора.

Частота обертання ротора

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Частота ЕРС, індукованої в обмотці ротора магнітним потоком, що обертається

$$f_2 = sf_1.$$

Діюче значення ЕРС, що індукується у фазних обмотках статора

$$E_1 = 4,44w_1k_1f_1\Phi_m,$$

де  $w_1$  – число витків фазної обмотки статора;  $k_1$  – її обмотувальний коефіцієнт.

Підведена активна потужність

$$P_1 = 3U_{1\phi}I_{1\phi} \cos \varphi_\phi = \sqrt{3}U_{1л}I_{1л} \cos \varphi_\phi.$$

Механічна потужність на валу

$$P_2 = M_2\omega_2 = 0,105M_2n_2.$$

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P_\phi}{P_2 + \sum P_\phi}.$$

Потужність втрат у двигуні

$$\sum P_\phi = P_{\phi e1} + P_{\phi e2} + P_{\phi m1} + P_{\phi m\kappa} + P_{\phi d},$$

де  $P_{\phi e1} = m_1R_1I_1^2 = 3R_1I_1^2$  і  $P_{\phi e2} = m_2R_2I_2^2 = 3R_2I_2^2$  – потужність електричних втрат в обмотках статора і ротора;  $P_{\phi m1}$  – потужність магнітних втрат в осерді статора;  $P_{\phi m\kappa}$  і  $P_{\phi d}$  – потужності механічних і додаткових втрат.

Електромагнітний момент

$$M = \frac{m_2R_2I_2^2}{s\omega_1} = \frac{3\frac{R'_2}{s}I_2^2}{\omega_1} = C\Phi_m I_2 \cos \psi_2 = C\Phi_m I_{2a} = \frac{C' \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + X_\kappa^2},$$

де  $I_{2a} = I_2 \cos \psi_2$  – активна складова струму в обмотці ротора;  $\cos \psi_2 = \cos(E_2 \wedge I_2)$ ,

$X_\kappa = X_1 + X'_2$  – індуктивний опір двигуна;  $C$  і  $C'$  – константи, відповідно

$$C = \frac{3}{\sqrt{2}} p\omega_1 k_1, \quad C' = \frac{3pU_1^2}{2\pi f}.$$

Критичне ковзання, що відповідає максимальному моменту

$$s_\kappa = \frac{R'_2 + R'_d}{\sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}} = \frac{R_2 + R_d}{X_2},$$

де  $R'_d$  – приведений додатковий опір реостата в ланцюзі ротора.

Максимальний (критичний) момент

$$M_{\kappa} = \frac{3U_1^2}{2\omega_1} \cdot \frac{1}{R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}$$

Спрощене рівняння механічної характеристики у відносних одиницях (формула Клосса)

$$M_* = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

Критичне ковзання може бути знайдене на підставі рівняння за відомими параметрами обмотки ротора або рівняння за відомими значеннями моментів і ковзання для якого-небудь характерного режиму роботи АД (пуск, номінальний режим). Наприклад, критичне ковзання, що відповідає природній механічній характеристиці, може бути знайдене за відомими для номінального режиму ковзання  $s_n$  і обертальним моментом  $M_* = 1$ .

$$s_{\kappa} = s_n \left( M_{\max_*} \pm \sqrt{M_{\max_*}^2 - 1} \right)$$

Робочі характеристики двигуна – це залежності  $n_2(P_2)$ ,  $s(P_2)$ ,  $M_2(P_2)$ ,  $P_1(P_2)$ ,  $I_1(P_2)$ ,  $\eta(P_2)$ ,  $\cos \varphi(P_2)$  при  $U_1 = const$  і  $f = const$ .

### Завдання до теми

2.1 Технічні дані асинхронного двигуна типу АО51-6 наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Тип	$P_n, кВт$	$n_n,$ об/хв	При номінальному навантаженні								
			Струм статора $I_n, А$ при напрузі, В				$\eta, \%$	$\cos \varphi$	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$
			127	220	380	500					
АО51-6	2,8	950	19,7	11,4	6,8	5,0	82,5	0,78	5,0	1,3	1,8

Двигун може бути виконаний на кожну із зазначених напруг.

Визначити: синхронну швидкість  $n_1$  і номінальне ковзання  $s_n$ ; моменти:

номінальний  $M_n$ , пусковий  $M_n$  і максимальний  $M_{\max}$ ; активну потужність  $P_{1n}$ , споживану з мережі при номінальному навантаженні; пусковий струм  $I_n$  при напрузі  $U_1 = 220\text{В}$ .

*Розв'язок*

Синхронна швидкість двигуна

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

де  $p$  – число пар полюсів.

Про синхронну швидкість можна судити також за номінальною швидкістю: якщо номінальна швидкість  $n_n = 950 \text{ об/хв}$ , то найближча синхронна швидкість  $n_1 = 1000 \text{ об/хв}$ .

Номінальне ковзання зазвичай коливається в межах від 1 до 6 %. У даному випадку:

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} \cdot 100 = \frac{1000 - 950}{1000} \cdot 100 = 5\%.$$

Момент на валу двигуна можна визначити за рівнянням

$$M = P/\omega = P \cdot 60/2\pi n = 9,55(P/n) \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де  $P$  – потужність на валу;  $\omega$  – кутова швидкість обертання вала.

Тоді

$$M_n = 9,55(2800/950) = 28,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_n = M_n (M_n/M_n) = 28,1 \cdot 1,3 = 36,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max} = M_n (M_{\max}/M_n) = 28,1 \cdot 1,8 = 50,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Потужність, споживана з мережі

$$P_{1n} = P_n/\eta = 2,8/0,825 = 3,4 \text{ кВт}.$$

Пусковий струм

$$I_n = I_n (I_n/I_n).$$

де  $I_n = P_n/(\sqrt{3}U_1 \cos \varphi \eta) = 2800/(1,73 \cdot 220 \cdot 0,78 \cdot 0,825) = 11,4 \text{ А}$ .

Тоді  $I_n = 57 \text{ А}$ .

2.2 Визначити ЕРС у фазах статора і ротора асинхронного двигуна з контактними кільцями в роторі, а також частоту ЕРС у роторі у двох випадках: ротор не рухомий і в номінальному режимі, обертається з ковзанням  $s_n = 0,03$ , і якщо максимальний магнітний потік, що припадає на полюс  $\Phi_m = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$ . Кількість витків і обмотувальні коефіцієнти статора і ротора:  $\omega_1 = 320$ ;  $\omega_2 = 26$ ;  $k_1 = 0,92$ ;  $k_2 = 0,96$ . Частота мережі  $f = 50 \text{ Гц}$ .

*Розв'язок*

ЕРС у фазі статора

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 k_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 320 \cdot 0,92 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 1630 \text{ В}.$$

У нерухомому роторі частота струму дорівнює частоті мережі. ЕРС у фазі нерухомого ротора

$$E_{2n} = 4,44 f_1 \omega_2 k_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 26 \cdot 0,96 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 138 \text{ В}.$$

ЕРС у фазі ротора, обертається із ковзанням  $s_n = 0,03$ .

$$E_2 = E_{2n} s_n = 138 \cdot 0,03 = 4,14 \text{ В}.$$

ЕРС, що виникає в роторі на початку пуску двигуна, при номінальному навантаженні зменшується до  $1 \div 6\%$   $E_{2n}$ .

Частота ЕРС ротора при номінальному навантаженні  $f_2 = f_1 s_n = 50 \cdot 0,03 = 1,5 \text{ Гц}$  (тільки при пуску частота ЕРС ротора дорівнює  $50 \text{ Гц}$ , а в номінальному режимі коливається звичайно в межах  $0,5$  до  $3 \text{ Гц}$ ).

2.3 Знайти струм у фазі ротора асинхронного двигуна (див. завдання 2.2) у номінальному режимі та в режимі пуску, якщо активний опір фази ротора  $r_2 = 0,2 \text{ Ом}$ , й індуктивний опір нерухомого ротора  $x_{2n} = 1 \text{ Ом}$ .

*Розв'язок*

Струм у фазі ротора  $I_2$  знаходиться за виразом:

$$I_2 = \frac{E_2}{z_{2s}} = \frac{E_{2n} s}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{2n})^2}} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{(r_2/s)^2 + (x_{2n})^2}}.$$

Струм в обертовому роторі можна розглядати як струм нерухомого ротора ( $E_{2n}$  – ЕРС нерухомого ротора), вважаючи, що повний опір його кола дорівнює:

$$z_{2s} = \sqrt{(r_2/s)^2 + (x_{2n})^2} .$$

Струм у фазі ротора при номінальному режимі ( $s_n = 0,03$ ):

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + (s_n x_{2n})^2}} = \frac{4,14}{\sqrt{0,2^2 + (0,03 \cdot 1)^2}} = 20,3 \text{ A} ;$$

$$\text{або } I_2 = \frac{E_{2n}}{\sqrt{(r/s)^2 + (x_{2n})^2}} = \frac{138}{\sqrt{(0,2/0,03)^2 + 1}} = 20,3 \text{ A} .$$

В режимі пуску двигуна  $s = 1$ , тоді ЕРС у фазі нерухомого ротора

$$E_{2n} = E_2/s_n = 4,14/0,03 = 138 \text{ В} ,$$

а пусковий струм у фазі ротора

$$I_{2n} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2n}^2}} = \frac{138}{\sqrt{0,2^2 + 1^2}} = 135 \text{ A} .$$

За час пуску двигуна еквівалентний опір кола ротора збільшується від  $r_2$  до  $r_2/s_n$ , що призводить до значного зменшення струму в роторі. Кратність пускового струму відносно до номінального зазвичай не перевищує  $5 \div 9$ .

2.4 Ротор двигуна при номінальному навантаженні обертається зі швидкістю  $n_n = 2970 \text{ об/хв}$ , частота мережі  $f = 50 \text{ Гц}$ , активний опір фази ротора  $r = 0,03 \text{ Ом}$ .

Визначити додатковий опір  $r_d$ , який необхідно включити в фазу обмотки ротора, щоб при тих же значеннях електромагнітного моменту і частоти мережі швидкість двигуна дорівнювала  $n = 2400 \text{ об/хв}$  (рис. 2.1).

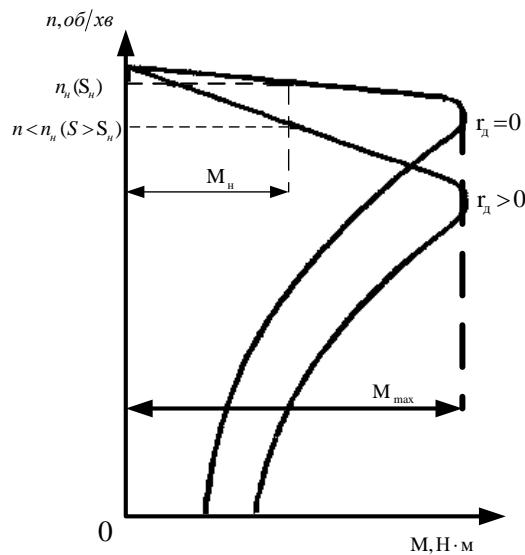


Рисунок 2.1

2.5 Номінальна потужність асинхронного двигуна  $P_n = 100 \text{ кВт}$ , при холостому ході потужність втрат  $P_0 = 5,15 \text{ кВт}$ , а при короткому замиканні (проводиться при номінальному струмі)  $P_k = 5,55 \text{ кВт}$ .

Визначити ККД при номінальному режимі.

2.6 Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором номінальною потужністю  $P_n = 100 \text{ кВт}$  має чотири полюси і підключений до мережі напругою  $U = 500 \text{ В}$ . Номінальний коефіцієнт потужності двигуна,  $\cos \varphi_n = 0,92$ , ККД  $\eta_n = 91,5 \%$ .

Визначити: число обертів двигуна  $n_n$  при ковзанні  $s_n = 1,65 \%$ ; номінальний момент  $M_n$ ; споживану потужність  $P_{1n}$  і струм  $I_n$  при номінальному режимі; пускової момент  $M_n$ , якщо  $M_n/M_n = 1,2$ .

2.7 Для двигуна (див. завдання 2.6) побудувати механічну характеристику  $M = f(s)$  при  $0 \leq s \leq s_{kp}$  за спрощеною залежністю:  $M = 2M_{max} / (s/s_{kp} + s_{kp}/s)$ .

Попередньо підрахувати з того ж виразу критичне ковзання  $s_{kp}$ , якщо  $M_{max}/M_n = 2,2$ .

На характеристиці показати моменти номінальний і максимальний.

2.8 Побудувати графік залежності обертового моменту двигуна від ковзання (від  $s = 0$  до  $s = s_{кр}$ ) для двигуна АО51-6, технічні дані якого наведено в табл. 2.1 (див. завдання 2.1).

2.9 Побудувати графік механічної характеристики двигуна АО51-6, технічні дані якого зведені в табл. 2.1 (див. завдання 2.1), для навантажувального режиму роботи, вважаючи характеристику прямолінійною в інтервалі  $0 \leq s \leq s_n$ .

2.10 Асинхронний двигун з контактними кільцями в роторі, увімкнений у мережу з напругою  $U_n = 380 В$ , частотою  $f = 50 Гц$ , має такі дані: число пар  $p = 3$ ; з'єднання  $Y/Y$ , число фаз  $m_1 = m_2 = 3$ ; число витків  $\omega_1 = 192$ ;  $\omega_2 = 36$ ; обмоткові коефіцієнти  $k_1 = 0,92$ ,  $k_2 = 0,98$ ; опір обмоток  $r_1 = 0,46 Ом$ ,  $r_2 = 0,02 Ом$ ,  $x_1 = 2,24 Ом$ ,  $x_{2н} = 0,08 Ом$ .

Визначити: номінальний струм при ковзанні  $s_n = 0,03$ ; пусковий струм двигуна  $I_n$  у випадку, коли пусковий реостат виведений і обмотка ротора замкнута; кратність пускового струму.

2.11 Розрахувати та побудувати одношарову обмотку статора з  $Z_1 = 36$ ,  $2p = 8$ ,  $m = 3$ , кількість пар паралельних витків  $a = 1$ .

Визначити: обмотковий коефіцієнт для першої гармоніки  $K_{об1}$ .

2.12 Трифазний асинхронний двигун із КЗ ротором має такі параметри: частота струму в обмотці ротора  $f_2 = 1 Гц$ , частота обертання вала  $n_2 = 490$  об/хв, частота мережі  $f_1 = 50 Гц$ .

Визначити: ковзання  $S$  у номінальному режимі; синхронну частоту обертання обертового магнітного поля  $n_1$ ; кількість пар полюсів  $p$ ; кількість пазів обмотки статора, якщо  $q = 2$ .

2.13 Асинхронний двигун із фазним ротором має такі технічні дані:  $S_n = 0,03$ ;  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Вб;  $w_1 = 320$ ,  $w_2 = 26$ ,  $K_{об1} = 0,92$ ,  $K_{об2} = 0,96$ ,  $f_1 = 50 Гц$ .

Визначити: ЕРС у фазній обмотці статора  $E_1$ ; ЕРС у фазній обмотці нерухомого  $E_2$  та рухомого ротора  $E_{2с}$ ; частоту струму в роторі  $f_2$ .



2.14 Трифазний асинхронний двигун із КЗ ротором має такі дані:  
 $P_{2H} = 100$  кВт,  $U_{1л} = 500$  В;  $\cos\varphi_H = 0,92$ ;  $\eta_H = 91,5\%$ ;  $2p = 4$ ;  $S_H = 1,65\%$ ;  
 $\lambda_M = M_{\max}/M_H = 2,2$ ;  $\lambda_i = I_{\pi}/I_{1H} = 5,5$ ;  $K_{\pi} = M_{\pi}/M_H = 1,2$ ; з'єднання – Y.

Визначити: номінальну частоту обертання  $n_{2H}$ ; номінальний момент  $M_H$ ; споживану з мережі потужність  $P_{1H}$ ; пусковий момент  $M_{\pi}$ ; номінальний струм  $I_{1H}$ ; критичне ковзання  $S_{кр}$ ; максимальний момент  $M_{\max}$ ; пусковий струм  $I_{\pi}$ ; значення пускового моменту  $M_{пз}$  та пускового струму  $I_{пз}$  при зниженні напруги живлення на 10 %.

### Контрольні питання

1. Який електродвигун називається асинхронним?
2. Будова та принцип дії асинхронного двигуна.
3. Від чого залежать головні розміри електричної машини? Чи будуть вирізнятися головні розміри електричних машин, спроектованих на одну й ту саму потужність, але на окрему частоту обертання; на різні номінальні напруги?
4. Який процес називається ковзанням?
5. Які параметри схеми заміщення асинхронного двигуна змінюються під час зміни ковзання від 1 до 0? Чим пояснюється ця зміна?
6. Як залежать максимальний і пусковий моменти від активних та індуктивних опорів статора і ротора?
7. Як змінюються струм двигуна та коефіцієнт потужності при збільшенні навантаження?
8. Як змінити напрямок обертання ротора двигуна?
9. Поясніть графіки робочих характеристик.
10. Який з вузлів асинхронного двигуна є найбільш надійним?

**Література:** [1, гл. 3; 2, гл. 3; 3, розд. 2; 4, мод. 3; 5, гл. 6].

### Практична робота № 3

#### Тема: Синхронні машини

**Мета:** розширення і закріплення теоретичних знань з розділу синхронні машини, а також вивчення сучасних методів розрахунків та проектування синхронних машин.

#### Короткі теоретичні відомості

Синхронна машина (СМ) – це електрична машина змінного струму, у якій частота обертання ротора і частота  $f$  струмів і ЕРС в обмотці якоря пов'язані чітким співвідношенням  $n = \frac{60f}{p}$ . У таких машинах у сталому режимі роботи результуюче магнітне поле і ротор обертаються з однаковою швидкістю (синхронно).

Номинальні дані: повна потужність  $S_n$  (для двигунів –  $P_n$  механічна потужність на валу), лінійна напруга  $U_n$  і струм  $I_n$  обмотки збудження.

#### *Синхронні генератори.*

ЕРС, індуковані у фазній обмотці якоря (статора):

– основним магнітним потоком  $\Phi_0$  збудження

$$E_0 = -j4,44 j\omega k \Phi_{0m} = jC_0 n \Phi_{0m};$$

– магнітним потоком  $\Phi_y$  якоря

$$E_y = -j4,44 j\omega k \Phi_{ym} = -jX_y I;$$

– магнітним потоком  $\Phi_{yроз}$  розсіювання якоря

$$E_{yроз} = -jX_{yроз} I,$$

де  $\omega$  – число витків фазної обмотки якоря;  $k$  – її обмотковий коефіцієнт;  $X_y$  і  $X_{yроз}$  – головний індуктивний опір фазної обмотки якоря і її індуктивний опір розсіювання, обумовлене магнітними потоками  $\Phi_y$  і  $\Phi_{yроз}$ ,  $\Phi_{0m}$  і  $\Phi_{ym}$  – амплітудні значення магнітних потоків  $\Phi_0$  і  $\Phi_y$ ;  $I$  струм якоря.

Кут навантаження – просторовий кут між осями результуючого магнітного потоку  $\Phi$  і потоку збудження  $\Phi_0$ . Оскільки  $X_y \gg X_{yроз}$ , кути  $\theta'$  і  $\theta$

практично рівні, тому надалі під кутом навантаження вважатимемо кут  $\theta$ .

Реакція якоря – вплив магнітного потоку  $\Phi_{\text{я}}$  на результуючий магнітний потік. При активно-індуктивному навантаженні реакція якоря призводить до зменшення результуючого магнітного потоку, а при активно-ємнісному навантаженні – до його збільшення.

Електромагнітна потужність і момент

$$P_{\text{ем}} = \frac{mUE_0}{X_c} \sin \theta; \quad M_{\text{ем}} = M = \frac{mUE_0}{\omega X_c} \sin \theta,$$

де  $m$  – число фаз обмотки якоря;  $\omega = \pi/30$  – кутова швидкість обертання ротора.

Повна, активна і реактивна потужність:

$$\left. \begin{aligned} S &= mUI = \frac{mUE_0}{X_c}; \\ P &= mUI \cos \varphi = \frac{mUE_0}{X_c} \sin \theta; \\ Q &= nUI \sin \varphi = \frac{mUE_0}{X_c} \cos \theta, \end{aligned} \right\}$$

де  $U$  і  $I$  – діючі значення напруги і струму якоря.

Режим роботи синхронної машини зазвичай характеризується значеннями напруги  $U$  і струму  $I$  якоря, зсувом фаз і струмом  $I_s$  збудження (чи ЕРС  $E_0$ ), причому для кожної з указаних величин справедливі наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + X_c I)^2}; \\ I &= \frac{-U \sin \varphi + \sqrt{(U \sin \varphi)^2 + (E_0^2 - U^2)}}{X_c}; \\ U &= -X_c I \sin \varphi + \sqrt{E_0^2 - X_c^2 I^2} \cos^2 \varphi; \\ \varphi &= \arcsin \frac{E_0^2 - U^2 - X_c^2 I^2}{2UIX_c}. \end{aligned}$$

Розрахунки, аналіз електромагнітних процесів у машині, побудова векторних діаграм істотно спрощуються, якщо користуватися відносними значеннями електричних величин. Узявши за базисні (одичні) повну номінальну потужність  $S_n$ , номінальну фазну напругу  $U_{\text{фн}}$  і струм  $I_{\text{фн}}$ , струм

збудження  $I_{30}$ , при  $E_0 = U_{\phi n}$  і повний опір фазної обмотки  $Z = U_{\phi n} / I_{\phi n}$  маємо

$$\left. \begin{aligned} U_* &= U / U_{\phi n}; E_{0*} = E_0 / U_{\phi n}; \\ I_* &= I / I_{\phi n}; I_* = I_3 / I_{30}; \\ P_* &= P / S_n = U_* I_* \cos \varphi = (U_* E_{0*} \sin \theta / X_{c*}); \\ Q_* &= Q / S_n = U_* I_* \sin \varphi = (U_* E_{0*} \cos \theta / X_{c*}); \\ X_{c*} &= X_c / Z, X_{я*} = X_{я} / Z, X_{я* \text{роз}*} = X_{я \text{роз}} / Z. \end{aligned} \right\}$$

Наведені вище формули справедливі і для величин у відносних одиницях (в.о.) і спрощуються при  $U = U_{\phi n}$ , оскільки в цьому випадку  $U_* = 1$ .

Характеристики синхронного генератора при роботі на автономне навантаження.

Характеристика холостого ходу :  $E_0(I_3)$  при  $I = 0$  і  $n = const$ .

Зовнішня характеристика –  $U(I)$  при незмінних  $I_3$ ,  $\cos \varphi$  і  $n$  (або  $f$ ).

Регулювальна характеристика –  $I_3(I)$  при незмінних  $U$ ,  $\cos \varphi$  і  $n$ .

Зовнішню і регулювальну характеристики СМ з ненасиченим магнітним колом можна розрахувати за формулами або визначити за допомогою векторних діаграм.

*Робота синхронного генератора паралельно з мережею.*

У момент увімкнення необхідно забезпечити: а) рівність діючих значень напруги мережі та генератора  $U_m = U_z = E_0$ ; б) збіг по фазі  $U_m$  і  $E_0 = U_z$ ; в) рівність частот  $f = f_z$  і г) однаковий порядок дотримання фаз енергосистеми і генератора.

У момент увімкнення  $I_3 = I_{30}$ ,  $E_0 = U_m$ ,  $I = 0$ , або у відносних одиницях  $I_{3*} = 1$ ,  $E_{0*} = U_{m*} = 1$ ,  $I_* = 0$ .

Рівняння напруги

$$U_m = E_0 - jX_m I = const.$$

Струм якоря генератора :

$$I = \frac{E_0 - U_m}{jX_m} = -\frac{\Delta U}{X_m},$$

де  $U$  – подібні характеристики – залежність  $I_3(I)$  при незмінних напрузі,

частоті мережі та  $P = const$ .

При регулюванні реактивної потужності в умовах  $U$  – подібних характеристик активна складова струму якоря  $I_a = const$  і струм якоря  $I = I_a + I_p$  змінюється за рахунок зміни реактивної складової  $I_p$  струму.

Кутові характеристики – залежності  $P(\theta)$  і  $M(\theta)$  при  $I_s = const$  і незмінній напрузі  $U_m = E_0 - jX_m I = const$  і частоті  $f_m$  мережі. У відносних одиницях

$$P_* = M_* = \frac{E_{0*}}{X_{c*}} \sin \theta.$$

Максимальна потужність і момент при  $I_s = const$

$$\left. \begin{aligned} P_m &= mU_m E_0 / X_c; \\ M_m &= mU_c E_0 / (\omega X_c); \\ P_{m*} &= M_{m*} = E_{0*} / X_{c*}. \end{aligned} \right\}$$

Статична перенавантажувальність

$$P_{\max*} = \frac{P_{m*}}{P_n} = \frac{E_{0n*}}{X_{c*} \cos \varphi_n},$$

де  $P_{m*}$  – максимальна потужність при  $I_s = I_{sn}$  ( $E_0 = E_{0n}$ );  $P_n$  – номінальна активна потужність генератора;  $\cos \varphi_n$  – номінальний коефіцієнт потужності. Для неявнополюсних СМ  $P_{\max*} \geq 1,7$ .

Ділянка стійкої роботи  $0 < \theta < \pi/2$ ;  $P_{\max*} > 1$ .

*Синхронні двигуни*

Робочі характеристики – залежності струму якоря  $I$ , обертового моменту  $M_2$ , коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  і ККД  $\eta$  від корисної механічної потужності  $P_2$  при  $I_s = const$  і  $U_m = U_n = const$ .

Кратність максимального моменту (перевантажувальна здатність)

$$M_{\max*} = \frac{M_{m*}}{M_n} = E_{0ном*} / (X_{c*} \cos \varphi_n),$$

де  $M_{m*} = \frac{mU_c E_{0n}}{\omega X_c}$  – максимальний обертовий (обертальний) момент при струмі

збудження  $I_s = I_{sn}$ ;  $M_n = P_n / \omega$  – номінальний обертовий момент.

Ділянка стійкої роботи:  $-\pi/2 < \theta < 0$ .

### Завдання до теми

3.1 Визначити струм і напругу генератора, якщо активна і реактивна потужності його навантаження  $P = 3500 \text{ кВт}$ ,  $Q = 1500 \text{ кВАР}$ , ЕРС  $E = 6,72 \text{ кВ}$ , активний і синхронний індуктивний опори якоря  $r_{\text{я}} = 0,14 \text{ Ом}$ ,  $x_{\text{я}} = 2 \text{ Ом}$ .

Обмотки якоря з'єднані зіркою.

*Розв'язок*

Весь розрахунок будемо проводити для однієї фази. Визначаємо фазну ЕРС

$$E_0 = E/\sqrt{3} = 6,72/1,73 = 3,88 \text{ кВ}.$$

Повна потужність навантаження

$$S_{\phi} = (1/3)\sqrt{P^2 + Q^2} = (1/3)\sqrt{3500^2 + 1500^2} = 1270 \text{ кВА}.$$

Коефіцієнт потужності навантаження

$$\cos \varphi = (1/3)P/S_{\phi} = 0,92; \quad \sin \varphi = (1/3)Q/S_{\phi} = 0,39.$$

Для визначення фазної напруги скористаємося формулою:

$$U_{\phi} = E_{\phi} - \Delta U,$$

$$\text{де } \Delta U = (r_{\text{я}} \cos \varphi + x_{\text{я}} \sin \varphi) I_{\phi} = 0,93 I_{\phi}.$$

З рівняння  $S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} = 1270 \text{ кВА}$  знаходимо, що  $I_{\phi} = 1270/U_{\phi}$ .

$$\text{Отже, } U_{\phi} = E_{\phi} - 0,93 \cdot 1270/U_{\phi}.$$

Звідки  $U_{\phi} = 3,55 \text{ кВ}$ .

Напруга генератора

$$U = \sqrt{3} U_{\phi} = 6,15 \text{ кВ}.$$

При з'єднанні обмоток якоря зіркою

$$I = I_{\phi} = S_{\phi}/U_{\phi} = 358 \text{ А}.$$

3.2 Два однотипні трифазні генератори працюють паралельно при напрузі  $U = 3,3 \text{ кВ}$ . Потужність споживача  $P = 8000 \text{ кВт}$  при  $\cos\varphi = 0,8$  розподіляються між генераторами порівну.

Визначити фазну ЕРС генератора при рівномірному розподіленому навантаженні та у випадку, якщо все навантаження буде переведено на один генератор. Напруга на шинах підтримується незмінною. Активний опір якоря  $r_{\text{я}} = 0,04 \text{ Ом}$ , синхронний індуктивний опір якоря  $x_{\text{я}} = 0,7 \text{ Ом}$ .

Обмотки якоря з'єднані зіркою.

*Розв'язок*

ЕРС генератора при рівномірно розподіленому навантаженні визначаємо за формулою:

$$E_{\phi} = U_{\phi} + \Delta U,$$

де  $\Delta U = (r_{\text{я}} \cos\varphi + x_{\text{я}} \sin\varphi) I_{\phi}$ .

$$\text{У свою чергу, } I_{\phi} = P / \sqrt{3} U \cos\varphi = 4000 / \sqrt{3} \cdot 3,3 \cdot 0,8 = 875 \text{ А.}$$

$$\text{Отже, } \Delta U = 0,396 \text{ кВ}; E_{\phi} = 3,31 \text{ кВ.}$$

Якщо все навантаження буде переведена на один генератор, то втрата напруги у нього буде в два рази більше і ЕРС зростає до значення  $E'_{\phi}$ :

$$E'_{\phi} = U_{\phi} + 2\Delta U = 3,3 / \sqrt{3} + 2 \cdot 0,396 = 2,706 \text{ кВ.}$$

3.3 Для підвищення коефіцієнта потужності  $\cos\varphi_1 = 0,76$  до  $\cos\varphi_2 = 0,95$  встановлено синхронний компенсатор.

Визначити потужність компенсатора та економію електроенергії на рік, якщо потужність споживача  $P = 600 \text{ кВт}$ , а потужність втрат у проводах  $P_{\text{пр}} = 60 \text{ кВт}$ . Активна потужність втрат у самому компенсаторі становить 5 % від його реактивної потужності.

Робота здійснюється у дві зміни (по 7 годин на зміну). Робочих днів за рік – 307.

### Розв'язок

Для підвищення  $\cos\varphi$  синхронний компенсатор підключають до споживача паралельно.

Значення необхідної реактивної потужності компенсатора  $Q_{\text{комп}}$  можна легко визначити із трикутника потужностей.

$$Q_{\text{комп}} = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 600(0,844 - 0,328) \approx 310 \text{ кВАР}.$$

Потужність втрат у компенсаторі

$$P_{\text{комп}} = 0,05Q_{\text{комп}} \approx 15,5 \text{ кВт}.$$

Повна потужність компенсатора

$$S_{\text{комп}} = \sqrt{P_{\text{комп}}^2 + Q_{\text{комп}}^2} = \sqrt{15,5^2 + 310^2} \approx 310 \text{ кВА}.$$

Потужність втрат у проводах до і після компенсації відповідно:

$$P_{1\text{пр}} = 3I_1^2 r_{\text{пр}} = 3\left[\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_1}\right]^2 \cdot r_{\text{пр}};$$

$$P_{2\text{пр}} = 3I_2^2 r_{\text{пр}} = 3\left[\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_2}\right]^2 \cdot r_{\text{пр}},$$

де  $I_1$  – струм компенсації;  $I_2$  – струм після компенсації;  $r_{\text{пр}}$  – опір проводів.

Відношення потужність втрат

$$P_{1\text{пр}}/P_{2\text{пр}} = \cos^2\varphi_2/\cos^2\varphi_1,$$

Звідки

$$P_{2\text{пр}} = P_{1\text{пр}} \cos^2\varphi_2/\cos^2\varphi_1 = 60 \cdot 0,76^2/0,95^2 = 38,4 \text{ кВт}$$

Економія в потужності при компенсації

$$P_{\text{ек}} = P_{1\text{пр}} - P_{2\text{пр}} - P_{\text{комп}} = 60 - 38,4 - 15,5 = 6,1 \text{ кВт}$$

Економія енергії в рік

$$W = P_{\text{ек}} T_{\text{рік}} = 6,1 \cdot 14 \cdot 307 = 26200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

3.4 Синхронний трифазний генератор номінальної потужності  $S_H = 10000 \text{ кВА}$  працює з коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi = 0,8$  при напрузі  $U = 6,3 \text{ кВ}$ . Обмотки генератора з'єднані зіркою. Активний та синхронний індуктивний



опори обмотки однієї фази відповідно  $r_y = 0,04 \text{ Ом}$ ,  $x_y = 1,0 \text{ Ом}$ . Число пар полюсів  $p = 2$ . Потужності втрат  $P_g = 1,3 \% P_n$ ,  $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} = 1,4 \% P_n$ .

Частота мережі  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Визначити: швидкість обертання  $n$ , ЕРС  $E$ , ККД  $\eta$  генератора; потужність  $P_{1n}$  турбіни, що приводить в обертання генератор.

Побудувати векторну діаграму.

3.5 Номінальні величини, що характеризують трифазний синхронний електродвигун, наступні:  $P_n = 125 \text{ кВт}$ ,  $n = 1500 \text{ об/хв}$ ;  $\eta_n = 0,91$ ,  $\cos \varphi_n = 0,9$  при струмі, який відстає від напруги. Фазні обмотки статора з'єднані зіркою. Електродвигун приєднаний до мережі напругою  $U = 500 \text{ В}$ , частотою  $f = 50 \text{ Гц}$  і жорстко з'єднаний з валом компресора. Під час роботи електродвигун розвиває номінальну потужність на валу. Індукована потоком збудження ЕРС на 40 % перевищує фазну напругу обмотки статора.

Знайти число пар полюсів ротора і номінальний струм у фазній обмотці статора.

Побудувати для заданого режиму роботи електродвигуна векторну діаграму, нехтуючи активним опором фазної обмотки статора. За діаграмою визначити кут  $\theta$  між векторами напруги  $U_n$  і ЕРС  $E_n$ .

Користуючись векторною діаграмою, визначити падіння напруги у фазній обмотці статора та її синхронний індуктивний опір.

Уважаючи навантаження на валу електродвигуна незмінним, побудувати векторні діаграми, що відповідають значенням ЕРС  $E$ , що перевищує напругу фазної обмотки статора на 120, 160, 180 %. Користуючись цими діаграмами, визначити значення струму статора та кут зсуву фаз.

Для цих же значень ЕРС визначити значення струму збудження, побудувавши характеристику холостого ходу  $E = f(I_g)$  за наступними даними:

$I_s, \% \dots$	50	80	100	150	200
$E, \% \dots$	58	87	100	120	132

За номінальне значення візьмемо  $E_n = 1,4U_\phi$ .

Побудувати криві залежності струму статора  $I$  та кута  $\theta$  від струму збудження  $I_s$ .

3.6 Трифазний синхронний двигун працює від мережі напругою  $U = 500\text{ В}$ . Струм двигуна  $I = 48\text{ А}$  при  $\cos\varphi = 1,0$ . Активний опір фази обмотки якоря  $r_a = 0,03\text{ Ом}$ , індуктивний опір  $x_a = 0,5\text{ Ом}$ .

Число витків  $\omega = 154$ . Обмотувальний коефіцієнт  $k = 0,96$ . Обмотки з'єднані зіркою. Частота мережі  $f = 50\text{ Гц}$ .

За допомогою векторної діаграми, нехтуючи активним падінням напруги в якорі, визначити зміну струму і  $\cos\varphi_2$  цього двигуна, якщо струм збудження буде змінюватися від 80 до 120 % від свого номінального значення. Залежність магнітного потоку від струму збудження прийняти лінійну, тобто вважати, що машина працює в режимі до насичення.

Магнітний потік  $\Phi = 0,00885\text{ в} \cdot \text{сек}$ , при якому двигун, маючи дане навантаження, працює  $\cos\varphi = 1,0$ .

3.7 Трифазний синхронний електродвигун має такі номінальні дані:  $P_n = 575\text{ кВт}$ ;  $U = 6000\text{ В}$ ;  $\eta = 95\%$ ;  $\cos\varphi_n = 1,0$ . Число полюсів  $p = 3$ .

Визначити: номінальний обертальний момент  $M_n$ ; номінальний струм  $I_n$ ; вартість споживаної електроенергії за 8 год роботи з номінальною потужністю, якщо  $1\text{ кВт} \cdot \text{год}$  коштує 1 грн.; величину реактивної потужності, яку можна компенсувати, якщо струм двигуна буде дорівнює номінальному значенню, а механічна потужність двигуна становить 75 % від номінальної.

3.8 У цеху встановлені асинхронні двигуни малої потужності, споживають з мережі  $500\text{ кВт} \cdot \text{год}$  при  $\cos\varphi_1 = 0,7$ .

Якої потужності синхронний компенсатор необхідний, щоб  $\cos\varphi_2 = 0,95$ . Потужність втрат компенсатора дорівнює 5 % від його реактивної потужності.

3.9 Параметри синхронного генератора такі: потужність  $S_n = 400\text{ кВА}$ ; номінальна лінійна напруга  $U_{1л} = 3,2\text{ кВ}$ ; синхронна частота обертання  $n = 750\text{ об/хв}$ ; номінальний коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_n = 0,9$ ; коефіцієнт

корисної дії  $\eta_n = 0,92$ , частота мережі  $f = 50$  Гц; з'єднання обмоток якоря – “зірка”.

Визначити: номінальну активну потужність  $P_n$ ; номінальний струм  $I_n$ ; потужність приводного двигуна  $P_d$ ; момент приводного двигуна  $M_d$ ; кількість пар полюсів  $p$ .

3.10 Синхронний двигун має такі параметри: номінальна потужність (корисна потужність на валу)  $P_n = 125$  кВт;  $U_n = 380$  В;  $\cos\varphi_n = 0,9$  (випереджувальний);  $\eta_n = 89,5\%$ ;  $n_n = 500$  об/хв; кратність пускового струму  $\lambda_i = I_{II}/I_n = 4,5$ ; кратність пускового моменту  $K_{II} = M_{II}/M_n = 1,2$ ; з'єднання обмоток – “зіркою”;  $f = 50$  Гц.

Визначити: активну потужність, споживану двигуном із мережі  $P_1$ ; номінальний  $I_n$  та пусковий  $I_{II}$  струми; номінальний  $M_n$  та пусковий  $M_{II}$  моменти; реактивну потужність двигуна  $Q$ ; сумарні втрати  $\Sigma P$ ; кількість полюсів  $p$ .

3.11 Неявнополюсний СГ має такі параметри:  $U_n = 10,5$  кВ;  $I_{30} = 234$  А; синхронний індуктивний опір  $X_c = 3,5$  Ом. Режим роботи генератора  $P_1 = 35$  МВт,  $I_3 = 400$  А, з'єднання обмоток “зірка”.

Визначити: як зміниться реактивна потужність генератора, якщо активну потужність збільшити до  $P_2 = 50$  МВт; побудувати векторні діаграми, кутову та U-подібну характеристики. Характеристику намагнічування вважати лінійною.

3.12 У фазній обмотці статора при холостому ході синхронного генератора індукується ЕРС  $E = 230$  В із частотою  $f = 50$  Гц. Яка кількість витків фазної обмотки  $w$ , якщо обмотковий коефіцієнт  $K_{об1} = 0,92$ , а потік магнітної індукції  $\Phi = 0,02$  Вб?

3.13 При зміні корисної потужності генератора на  $\Delta P_2 = 1$  кВт його ККД збільшується на 2%. Яке початкове значення ККД  $\eta$  та підведеної до генератора потужності  $P_1$ , якщо сумарні втрати потужності  $\Sigma P = 0,5$  кВт?

3.14 Явнополюсний трифазний синхронний двигун має параметри:  $U_1 = 6000$  В;  $E_0 = 6538$  В;  $2p = 6$ ;  $X_d = 85,9$  Ом;  $X_q = 50,9$  Ом;  $2p = 6$ ;  $\theta = 21,6^\circ$ ;

$f_1 = 50$ ; з'єднання обмотки статора –  $Y$ . Визначити основний  $M_{ЕМЕ}$ , реактивний  $M_{ЕМU}$  і електромагнітний  $M_{ЕМ}$  моменти СД.

### Контрольні питання

1. Поясніть будову і принцип дії трифазного синхронного двигуна.
2. Характеристики синхронних машин?
3. Різновиди синхронних машин?
4. Перелічіть способи пуску трифазного синхронного двигуна.
5. Регульовальна і кутова характеристики СД?
6. Векторна діаграма СМ; переваги і недоліки СД?
7. Поясніть, яким чином можна змінити коефіцієнт потужності синхронного двигуна, що працює при незмінному навантаженні.
8. Чому зі збільшенням навантаження на валу синхронного двигуна частота обертання його ротора не змінюється?
9. За яких умов відбувається випадання синхронного двигуна із синхронізму, у чому воно виявляється?
10. Синхронний компенсатор; призначення, принцип дії, схема і векторні діаграми?

**Література:** [1, гл. 4; 2, гл. 4; 3, розд. 3; 4, мод. 4; 5, гл. 7].

### Практична робота № 4

**Тема:** Машини постійного струму

**Мета:** розширення і закріплення теоретичних знань із розділу машини постійного струму, а також вивчення сучасних методів розрахунків та проектування електричних машин.

#### Короткі теоретичні відомості

Машина постійного струму – електрична машина, яка перетворює електричну енергію постійного струму на механічну і навпаки. Машини постійного струму класифікуються: а) за призначенням – генератори і двигуни постійного струму; б) за способом збудження (залежно від того, як обмотка

збудження ввімкнена відносно обмотки якоря): з незалежним, паралельним, послідовним, змішаним збудженням (МПС має одну послідовну і одну паралельну обмотки збудження), з постійними магнітами.

Номінальні дані: потужність  $P_n$ , напруга на головних затискачах машини  $U_n$ , струм  $I_n$ , частота обертання  $n_n$ , ККД  $\eta_n$ .

ЕРС якорі (ЕРС паралельної гілки обмотки якоря)

$$E_{\text{я}} = C_0 \omega \Phi,$$

де  $C_0 = \frac{Np}{2\pi\alpha}$  – стала,  $N$  – число активних провідників в обмотці якоря;

$p$  – число пар головних полюсів;  $\alpha$  – число пар паралельних гілок обмотки

якоря;  $\omega = \frac{\pi n}{30}$  – кутова швидкість обертання якоря.

Магнітний потік на полюс

$$\Phi = B_{\text{cp}} l \tau$$

де  $B_{\text{cp}}$  – середнє значення магнітної індукції в повітряному проміжку під головним полюсом;  $l$  – розрахункова довжина осердя якоря;  $\tau$  – полюсне ділення (частина кола якоря, що припадає на один полюс).

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ен}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} = \omega M_{\text{ен}},$$

де  $I_{\text{я}}$  – струм якоря.

Електромагнітний момент

$$M_{\text{ен}} = M = C_0 I_{\text{я}} \Phi = \frac{P_{\text{ен}}}{\omega}.$$

Потужність втрат у МПС

$$\sum P_{\text{в}} = P_{\text{вмх}} + P_{\text{вм}} + P_{\text{ве}} + P_{\text{вз}} + P_{\text{вд}},$$

де  $P_{\text{вмх}}$ ,  $P_{\text{вм}}$ ,  $P_{\text{ве}}$  – потужність механічних, магнітних (потужність втрат у сталі осердя якоря) та електричних (в обмотці якоря) втрат відповідно, причому  $P_{\text{ве}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ , де  $R_{\text{я}}$  – внутрішній опір ланцюга якоря;  $P_{\text{вз}} = U_{\text{з}} I_{\text{з}} = I_{\text{з}}^2 R'_{\text{з}}$  – потужність втрат на збудження в МПС з електромагнітним збудженням, де  $I_{\text{з}}$  і  $U_{\text{з}}$  – струм

у ланцюзі збудження і напруга на її затискачах, а  $R'_3$  – еквівалентний опір цього ланцюга;  $P_{\text{вд}} = 0,01P_n I_*$  – потужність додаткових втрат,  $I_* = I/I_n$  – відносне значення струму МПС.

Коефіцієнт корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P_3}{P_2 + \sum P_6},$$

де  $P_1$  – потужність, що підведена до МПС;  $P_2$  – корисна потужність МПС.

*Генератори постійного струму.*

Рівняння напруги генератора

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Корисна електрична потужність

$$P_2 = UI,$$

де струм генератора

$$I = \begin{cases} I_{\text{я}} - I_3 & \text{— при паралельному або змішаному збудженні,} \\ I_{\text{я}} & \text{— при інших способах збудження.} \end{cases}$$

Підведена механічна потужність

$$P_1 = \omega M_1 = P_2 + \sum P_6 = \frac{P_2}{\eta},$$

де  $M_1$  – обертовий момент на валу первинного двигуна.

Характеристики генератора : холостого ходу  $U_0 = E_{\text{я}} = f(I_3)$  при  $I_{\text{я}} = 0$

і  $n = \text{const}$  ; зовнішня  $U = f(I_{\text{я}})$  при  $R'_3 = R_3 + R_{p3} = \text{const}$  і  $n = \text{const}$  ,

$R_{p3}$  — опір регулювального реостата в ланцюзі збудження.

Регулювальна  $I_3 = f(I_{\text{я}})$  при  $U = \text{const}$  і  $n = \text{const}$  .

де  $R_3$  — опір обмотки збудження,

*Двигуни постійного струму.*

Рівняння напруги

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Рівняння руху

$$M - (M_0 + M_2) = J \frac{d\omega}{dt},$$

де  $M_0$  — момент холостого ходу, обумовлений магнітними і механічними втратами в двигуні;  $M_2$  — корисний момент на валу;  $J$  — момент інерції обертальних мас.

У сталому режимі роботи двигуна (при  $n = const$ )

$$M = (M_0 + M_2) = C_0 I_a \Phi.$$

Корисна механічна потужність на валу

$$P_2 = \omega M_2.$$

Споживана з мережі електрична потужність

$$P_1 = \begin{cases} UI + P_{\text{вз}} - \text{при незалежному збудженні;} \\ UI - \text{при інших способах збудження,} \end{cases}$$

де  $P_{\text{вз}}$  — потужність втрат на збудження.

Струм двигуна

$$I = \begin{cases} I_a + I_z - \text{при паралельному або змішаному збудженні,} \\ I_a - \text{при інших способах збудження.} \end{cases}$$

Струм якоря у сталому режимі

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{M_0 + M_2}{C_0 \Phi} = \frac{M_0}{C_0 \Phi} + \frac{M_2}{C_0 \Phi} = I_{0a} + \frac{M_2}{C_0 \Phi},$$

де  $I_{0a}$  — струм якоря в режимі холостого ходу.

Кутова швидкість обертання у сталому режимі

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{C_0 \Phi} = \frac{U - I_{0a} R_a}{C_0 \Phi} - R_a \frac{M_2}{(C_0 \Phi)^2} = \omega_0 - R_a \frac{M_2}{(C_0 \Phi)^2}.$$

Пусковий струм якоря

$$I_{an} = \frac{U}{R_a + R_n},$$

де  $R_n$  — опір пускового реостата у момент пуску.

Кратність пускового струму

$$I_{n*} = I_{an} / I_n,$$

де  $I_n$  — пусковий струм.

### Завдання до теми

4.1 Генератор паралельного збудження має такі номінальні дані:  
 $P_n = 11,3 \text{ кВт}$ ;  $U_n = 115 \text{ В}$ . Потужність втрат:  $P_g = 700 \text{ кВт}$ ;  $P_{\text{я}} = 800 \text{ кВт}$ ;  
 $P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 600 \text{ кВт}$ .

Визначити: опір кола збудження  $r_g$ ; ЕРС  $E_n$  якоря при номінальному навантаженні генератора; струм короткого замикання  $I_k$ , якщо залишковий магнітний потік становить 3 % від його номінального значення. Швидкість обертання якоря  $n$  постійна.

*Розв'язок*

Опір кола збудження  $r_g$ :

$$r_g = U_n^2 / P_g = 115^2 / 700 = 18,9 \text{ Ом}.$$

Опір обмотки якоря

$$r_{\text{я}} = P_{\text{я}} / I_{\text{ян}}^2$$

де  $I_{\text{ян}} = I_n + I_g = \frac{P_n}{U_n} + \frac{P_g}{U_n} = 104,4 \text{ А}$  — номінальне значення струму якоря.

Отже,  $r_{\text{я}} = 0,0735 \text{ Ом}$ .

При постійній швидкості обертання якоря  $n$  ЕРС

$$E = C_E n \Phi = K \Phi \text{ і } E/E_n = \Phi/\Phi_n,$$

де  $E_n = U_n + r_{\text{я}} I_{\text{ян}} = 115 + 104,4 \cdot 0,0735 = 122,6 \text{ В}$ .

За умовою задачі  $\Phi$  становить 3 % від  $\Phi_n$ , отже  $E_k$ , складе 3 % від  $E_n$ .

Тому

$$I_{\text{я}} = (E - U) / r_{\text{я}} = I_{\text{як}} = E_k / r_{\text{я}} = 0,03 \cdot 122,6 / 0,0735 = 50 \text{ А}.$$

При короткому замиканні  $U = 0$ .

4.2 Генератор змішаного збудження (рис. 4.1) при номінальних даних  
 $P_n = 17,4 \text{ кВт}$ ,  $U_n = 230 \text{ В}$  має потужності втрат в обмотці якоря і додаткових



полюсах  $P_{\text{я}} = 3,5\%$ , у послідовній обмотці збудження –  $P_{\text{з.с}} = 1,5\%$ , а в паралельній –  $P_{\text{з.ш}} = 4\%$ .

Визначити: опори  $r_{\text{я}}$ ,  $r_{\text{с.с}}$  і  $r_{\text{з.ш}}$ ; ЕРС якоря при номінальному режимі.

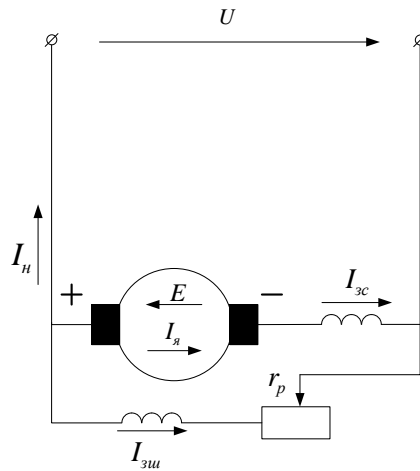


Рисунок 4.1

*Розв'язок*

Номінальний струм генератора

$$I_{\text{н}} = P_{\text{н}} / U_{\text{н}} = 17,4 \cdot 10^3 / 230 = 75,65 \text{ A} .$$

Опір і струм паралельного кола збудження відповідно:

$$r_{\text{з.ш}} = 100 U_{\text{н}}^2 / (P_{\text{з.ш}} P_{\text{н}}) = 100 \cdot 230^2 / (4 \cdot 17,4 \cdot 10^3) = 76 \text{ Ом} .$$

$$I_{\text{з.ш}} = U_{\text{н}} / r_{\text{з.ш}} = 230 / 76 = 3,03 \text{ A} .$$

Струм в обмотці якоря при номінальному режимі

$$I_{\text{ян}} = I_{\text{з.с}} = I_{\text{з}} + I_{\text{з.ш}} = 75,65 + 3,03 \approx 78,68 \text{ A}$$

Опір кола якоря

$$r_{\text{я}} = \frac{P_{\text{я}}}{I_{\text{ян}}^2} = \frac{3,5 P_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}^2 \cdot 100} = \frac{3,5 \cdot 17,4 \cdot 10^3}{78,68^2 \cdot 100} = 0,098 \text{ Ом} .$$

Опір послідовної обмотки збудження

$$r_{\text{з.с}} = \frac{P_{\text{з.с}}}{I_{\text{з.с}}^2} = \frac{1,5 P_{\text{н}}}{I_{\text{з}}^2} = \frac{1,5 \cdot 17,4 \cdot 10^3}{78,68^2 \cdot 100} = 0,042 \text{ Ом} .$$

ЕРС якоря при номінальному режимі

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} + I_{\text{ян}} (r_{\text{я}} + r_{\text{з.с}}) = 230 + 78,68(0,098 + 0,042) = 241 \text{ В} .$$

4.3 Генератор малої потужності з постійними магнітами використовують як тахогенератор. Опір обмоток якоря  $r_{\text{я}} = 20 \text{ Ом}$ . Навантаження генератора – вольтметр із внутрішнім опором  $r_{\text{V}} = 3600 \text{ Ом}$ . Для спостереження з іншого пункту був паралельно до нього увімкнений другий вольтметр із внутрішнім опором  $r_{\text{V}} = 3000 \text{ Ом}$ .

Визначити похибку вимірювання при підключенні другого вольтметра. Впливом реакції якоря знехтувати.

*Розв'язок*

ЕРС тахогенератора при сталості магнітного потоку залежить тільки від швидкості обертання  $n$ :

$$E = C_{\text{E}} n \Phi.$$

Підключення другого вольтметра збільшить струм якоря і втрату напруги в ньому. При вимірі одним вольтметром напруга буде  $U$ , при вимірі двома –  $U'$ . Оскільки ЕРС незмінна, то

$$E = U + r_{\text{я}} I_{\text{я}} = U' + r_{\text{я}} I'_{\text{я}} = \frac{r_{\text{V}} + r_{\text{я}}}{r_{\text{V}}} U,$$

$$U' = E - r_{\text{я}} I'_{\text{я}} = E - r_{\text{я}} \frac{U'}{r_{\text{ек}}} = E \frac{r_{\text{ек}}}{r_{\text{ек}} + r_{\text{я}}} = U \frac{r_{\text{V}} + r_{\text{я}}}{r_{\text{V}}} \cdot \frac{r_{\text{ек}}}{r_{\text{ек}} + r_{\text{я}}},$$

$$\text{де } r_{\text{ек}} = \frac{r_{\text{V}} \cdot r'_{\text{V}}}{r_{\text{V}} + r'} = \frac{3500 \cdot 3000}{3500 + 3000} = 1615 \text{ Ом}.$$

Точність вимірювання

$$\frac{U'}{U} = \frac{(r_{\text{V}} + r_{\text{я}}) \cdot r_{\text{ек}}}{(r_{\text{ек}} + r_{\text{я}}) \cdot r_{\text{V}}} \cdot 100 = \frac{(3500 + 20) \cdot 1615}{(1615 + 20) \cdot 3500} \cdot 100 = 99,3 \%.$$

При підключенні другого вольтметра показання тахогенератора будуть нижчими на 0,7 %.

4.4 Генератор незалежного збудження має такі номінальні дані:  $P_{\text{н}} = 20 \text{ кВт}$ ,  $U_{\text{н}} = 230 \text{ В}$ . Опір кола збудження  $r_{\text{г}} = 15,7 \text{ Ом}$ , опір обмоток якоря (включаючи опір обмоток додаткових полюсів і опір щіток)  $r_{\text{я}} = 0,17 \text{ Ом}$ , потужності втрат у

сталі та механічні  $P_{ст} + P_{мех} = 0,95 \text{ кВт}$ .

Визначити ЕРС генератора  $E$ , напругу на затискачах генератора і його ККД (реакцією якоря нехтуємо) при навантаженнях  $\beta$ , що становлять  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{4}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{2}{4}$  і  $\frac{1}{4}$  від номінального.

Побудувати графіки залежності  $U = f(\beta)$  і  $\eta = \psi(\beta)$ .

4.5 Електродвигун постійного струму паралельного збудження має такі номінальні дані:  $P_n = 10 \text{ кВт}$ ,  $U_n = 220 \text{ В}$ ,  $\eta_n = 86\%$ ,  $n_n = 2250 \text{ об/мин}$ . Потужність втрат двигуна становить  $P_g = 5\%$ ,  $P_я = 4,6\%$  від споживаної номінальної потужності.

Визначити: величину опору пускового реостата  $r_n$  для пуску двигуна пусковим струмом, у два рази перевищує його номінальне значення; величину номінального електромагнітного обертового моменту  $M_n$ ; величину пускового обертового моменту  $M_n$ , уважаючи, що магнітний потік залишається без зміни; швидкість обертання двигуна, якщо він працює як генератор, віддаючи за умови  $U_{об} = U_{зен}$  у мережу  $P_n$ .

4.6 Електродвигун постійного струму послідовного збудження має такі номінальні дані:  $U_n = 440 \text{ В}$ ;  $n_n = 1020 \text{ об/хв}$ ;  $M_n = 147 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; опір обмотки якоря  $r_я = 0,6 \text{ Ом}$ ; опір обмотки збудження  $r_з = 0,47 \text{ Ом}$ ; ККД  $\eta_n = 84,2\%$ .

Визначити: номінальну потужність двигуна  $P_n$ ; потужність, що підводиться з мережі  $P_{1n}$ ; струм двигуна  $I_n$ ; втрати в якорі та обмотці збудження  $P_я$ ,  $P_з$ ; опір пускового реостата  $r_n$ ; величину пускового моменту при  $I_n = 2,5I_n$ , якщо відомо, що збільшення струму збудження у 2,5 рази відповідають підвищенню магнітного потоку в 1,8 рази.

4.7 Для завдання 4.5 визначити: швидкість обертання двигуна  $n'$ , якщо в ланцюг обмотки збудження ввести опір регулювального реостата, який дорівнює 15% від опору кола збудження при номінальному режимі, ККД  $\eta'$ ;

швидкість обертання  $n''$  і обертальний момент  $M$  двигуна, якщо струм  $I_a = 0,5I_{a.n}$ .

Графік залежності магнітного потоку від струму збудження наведено на рис. 4.2.

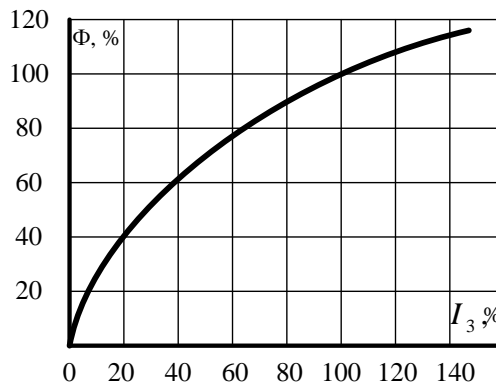


Рисунок 4.2

4.8 Визначити тривалість перехідного режиму і коефіцієнт підсилення електромашинного підсилувача, якщо струм керування  $I_y = 8\text{ мА}$ , опір обмотки керування  $r_y = 7500\text{ Ом}$ , потужність на виході  $P = 1400\text{ Вт}$ , постійна часу  $\tau = 0,12\text{ с}$ .

4.9 Двигун паралельного збудження, який споживає з мережі потужність  $P_1 = 10\text{ кВт}$  при напрузі  $U = 110\text{ В}$ , має швидкість обертання  $n = 1250\text{ об/хв}$ . Потужність втрат у ланцюзі якоря  $P_a = 0,5\text{ кВт}$ , у колі збудження  $P_z = 0,6\text{ кВт}$ , у сталі і механічні  $P_{ст} + P_{мех} = 0,8\text{ кВт}$ .

Визначити: ККД двигуна  $\eta$ ; опір ланцюга збудження  $r_z$  і якоря  $r_a$ ; проти-ЕРС  $E_n$ ; обертальний момент  $M$ ; опір пускового реостата  $r_n$  при  $I_n = 2I_n$ .

4.10 Двигун послідовного збудження, номінальною потужністю  $P_n = 5,6\text{ кВт}$ , увімкнений у мережу напругою  $U = 220\text{ В}$ . Швидкість його обертання  $n = 1350\text{ об/хв}$ , ККД –  $\eta = 80\%$ . Опір обмотки якоря в півтора раза більший за опір обмотки збудження, потужність втрат у сталі та механічні  $P_{ст} + P_{мех} = 50\text{ кВт}$ .

Визначити: обертальний момент  $M$ ; опір обмотки якоря  $r_{\text{я}}$ ; потужність втрат у якорі  $P_{\text{я}}$ ; опір пускового реостата  $r_n$  для пуску двигуна при  $I_n = 2,5I_n$ .

4.11 Двигун постійного струму має просту хвильову обмотку, кількість пазів якоря  $Z = 25$ , число полюсів  $2p = 4$ , кількість витків у секції  $W_c = 4$ , число пазових сторін в одному фізичному пазі  $S_n = 3$ , магнітний потік  $\Phi = 0,65 \cdot 10^{-2}$  Вб, струм якоря  $I_a = 27$  А, частота обертання вала 1500 об/хв.

Визначити: кроки хвильової обмотки  $y_1, y_2, y, y_k$ , електромагнітну потужність двигуна  $P_{\text{ел}}$ .

4.12 Розрахувати та побудувати природну й штучну (з  $R_d$ ) механічну характеристику ДПС із компенсаційною обмоткою і незалежним збудженням із такими параметрами:  $U_n = 440$  В;  $I_n = 25$  А;  $R_a = 0,3$  Ом;  $\eta_n = 0,95$ ;  $n_0 = 1134$  об/хв;  $\Delta U_{\text{щ}} = 2,5$  В;  $R_d = 3$  Ом.

4.13 ДПС із компенсаційною обмоткою і незалежним збудженням має параметри:  $U_n = 440$  В;  $n_0 = 1134$  об/хв;  $n_n = 1108$  об/хв. Знайти напругу  $U^*$ , яку треба подати на двигун, щоб швидкість обертання  $n^* = 700$  об/хв при зменшеному моменті навантаження у два рази від номінального.

4.14 Генератор постійного струму з паралельним збудженням має параметри:  $U_n = 110$  В,  $n_n = 3000$  об/хв,  $P_n = 3,5$  кВт,  $R_a = 0,38$  Ом,  $R_3 = 125$  Ом,  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В. Розрахувати частоту обертання вала машини  $n$ , якщо її використовують як двигун із паралельним збудженням при  $U_n = 110$  В,  $P_n = 3$  кВт. При розрахунку знехтувати реакцією якоря та втратами в машині.

4.15 ЕРС в обмотці якоря генератора постійного струму з паралельним збудженням  $E = 127$  В; напруга на клеммах  $U = 115$  В; опір обмотки якоря  $R_a = 0,2$  Ом; опір обмотки збудження  $R_3 = 71$  Ом; падіння напруги на щітках  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В. Визначити струм навантаження генератора  $I_n$ .

### Контрольні питання

1. Конструкція і принцип дії МПС, рівняння електричної рівноваги і моментів.
2. Класифікація МПС за способом з'єднання обмотки збудження з обмоткою якоря.

3. Яке призначення колектора в генераторі та двигуні постійного струму?
4. Які способи збудження використовують у машинах постійного струму?
5. Які способи обмеження пускового струму двигунів?
6. Які види втрат у машинах постійного струму?
7. Як улаштований генератор постійного струму?
8. Як відбувається процес самозбудження генератора?
9. Комутація МПС і причини іскріння на колекторі.
10. Електромашинний підсилювач із поперечним полем.

**Література:** [1, гл. 1; 2, гл. 5; 3, розд. 4; 4, мод.1; 5, гл. 4].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Загірняк М. В. Електричні машини: підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – 2-ге вид., перероб. і доповн. – Київ: Знання, 2009. – 399 с.
2. Копылов И. П. Электрические, машины: учеб. для ВУЗов / Копылов И. П. – Москва: Энергоиздат, 1986. – 360 с.
3. Некрасов В. А. Электрические машины: конспект лекций для студ. электротех. спец. / В. А. Некрасов, А. В. Некрасов, А. В. Решетняк. – Кременчуг: КГПУ, 2007. – 159 с.
4. Онушко В. В. Електричні машини: навч. посібник / В. В. Онушко, О. В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 487 с.
5. Иванов И. И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи: сборник задач / И. И. Иванов, А. Ф. Лукин, Г. И. Соловьев. – 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2002. – 192с.
6. Пономаренко В. К. Сборник задач с решениями по общей электротехнике: учеб. пособие / В. К. Пономаренко, А. Ф. Симонов, В. И. Константинов и др. – Москва : Высш. школа, 1972. -184

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни „Електричні машини” для студентів денної та заочної форм навчання за напрямом 6.050702 – «Електромеханіка» і 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології» (у тому числі для скороченого терміну навчання)

Укладачі: к.т.н., професор В. О. Некрасов,  
к.т.н., доцент А. В. Некрасов,  
асист. Р. М. Донченко,  
асист. В.В. Ромашина

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. М. В. Загірняк

Підп. до др. \_\_\_\_\_. Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.  
Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_. Наклад \_\_\_\_\_ прим. Зам. № \_\_\_\_\_. Безкоштовно.

Видавничий відділ  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600