

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»

Кафедра відновлюваних джерел енергії

**ПРОЕКТУВАННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО  
ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

Навчально-методичний посібник для студентів,  
що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

Дніпропетровськ, НГУ  
2016

Проектування трифазного синхронного генератора з постійними магнітами:  
Навчально-методичний посібник для студентів, що навчаються за спеціальністю  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ О.Б. Іванов. -  
Д.:Національний гірничий університет, 2016. – 45 с.: іл.

## Зміст

	Стор.
1. Вихідні дані	4
2. Зміст курсового проекту	4
3. Визначення головних розмірів генератора	5
4. Обмотка і магнітопровід якоря	7
5. Активний опір та індуктивний опір розсіювання якоря	19
6. Визначення розмірів ротора	23
7. Індуктивні опори реакції якоря	25
8. Розрахунок магнітного кола генератора	27
9. Робоча діаграма магніту	36
10. Зовнішні характеристики генератора	40
11. Основні вихідні та розрахункові параметри	43
Література	44

# Проектування трифазного синхронного генератора з постійними магнітами

## 1. Вихідні дані

Проектування виконується за наступними вихідними даними:

- число фаз генератора  $m$ ;
- номінальна активна потужність  $P_H$ , що віддається генератором у мережу, кВт;
- номінальний коефіцієнт потужності  $\cos \varphi_H$ ;
- номінальна лінійна напруга генератора  $U_{нл}$ , В
- номінальна частота  $f_H$ ;
- номінальна частота обертання  $n_H$ , об/хв.;
- спосіб охолодження;
- рекомендований матеріал постійного магніту;
- рекомендована конструкція ротора – зіркоподібний ротор з призматичними радіально намагніченими постійними магнітами;
- клас нагрівостійкості ізоляції - В.

Завдання проекту - визначити головні розміри генератора, спроектувати його магнітне коло і обмотку якоря, визначити основні параметри та зовнішні характеристики

## 2. Зміст курсового проекту

Курсовий проект складається з розрахунково-пояснювальної записки, на папері формату А4, та одного листа креслень, виконаних у відповідності до діючого стандарту ВНЗ.

Зміст записки повинен містити розділи, наведені у подальшому тексті методичного посібника.

На листі креслень повинно бути наведено схему магнітного кола проектованого синхронного генератора з постійними магнітами та креслення пазу якоря з розміщенням у ньому ізоляції та провідників обмотки, виконані у стандартних масштабах з вказаними розрахунковими розмірами; робочу діаграму постійних магнітів; графік залежності ЕРС збудження від поздовжньої складової струму якоря; графік зовнішніх характеристик генератора для значень відстаючого коефіцієнта потужності 1,0; 0,8; 0,6; таблицю основних вихідних та розрахункових параметрів генератора.

### 3. Визначення головних розмірів генератора

*Головними розмірами електричної машини* при її проектуванні вважають *внутрішній діаметр магнітопроводу статора  $D$  і осеву довжину повітряного зазору  $l_\delta$* . Вони розраховуються з використанням формули машинної постійної Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta n_H}{S_p} = \frac{6,1}{\alpha_\delta k_E k_o B_\delta A},$$

де  $S_p$  - розрахункова повна потужність машини

Розрахункова повна потужність синхронного генератора у номінальному режимі дорівнює

$$S_p = \frac{k_E P_H}{\cos \varphi_H}, \text{ кВА,}$$

де  $k_E$  – відношення діючого значення індукованої в фазі обмотки якоря ЕРС до діючого значення фазної напруги генератора у номінальному режимі:

$$k_E = \frac{E_H}{U_H}.$$

Для синхронних генераторів з постійними магнітами  $k_E = 1.2 - 1.4$ .

Так як умови охолодження машини залежать від співвідношення між осевою довжиною магнітопроводу  $l_\delta$  і величиною полюсного поділку  $\tau$ , врахуємо його при визначенні головних розмірів, приймаючи до уваги, що

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{l_\delta 2p}{\pi D},$$

де  $p$  - кількість пар полюсів машини,  $\tau$  – полюсний поділок, м.

Значення  $\lambda$ , за якого забезпечуються належні умови охолодження синхронної машини залежить від числа полюсів і може бути визначено за допомогою графіку, що наведений на рис. 1.

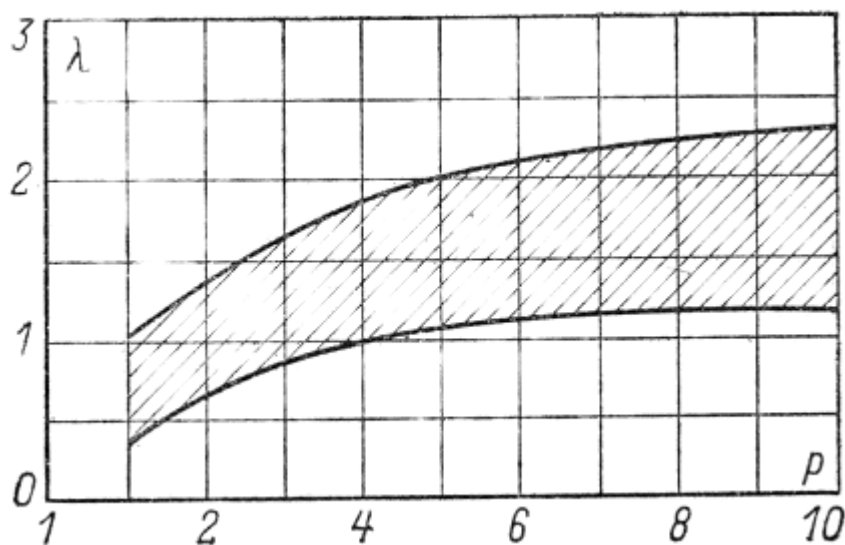


Рис 1. До вибору значення коефіцієнта  $\lambda$  в залежності від числа пар полюсів

Враховуючі наведені міркування, маємо:

$$D = \sqrt[3]{\frac{12,2pS_p}{\lambda\pi n_n \alpha_\delta k_B k_o B_\delta A}},$$

$$l_\delta = \frac{\lambda\pi D}{2p},$$

де  $\alpha_\delta$  - коефіцієнт полюсного перекриття,

$k_B$  - коефіцієнт форми ЕРС,

$k_o$  - обмотковий коефіцієнт,

$B_\delta$ —магнітна індукція поля збудження по осі полюса, Т,

$A$  - лінійне струмове навантаження якоря, А/м.

Коефіцієнти  $\alpha_\delta$  та  $k_B$  орієнтовно приймаються у діапазоні  $\alpha_\delta = 0.6 \dots 0.73$ ,  $k_B = 1.08 \dots 1.13$ , враховуючи, що при збільшенні відносної ширини полюса по відношенню до полюсного ділення у межах  $0,5 \dots 0,8$  коефіцієнта  $\alpha_\delta$  зростає, а  $k_B$  зменшується.

У синхронних генераторах з постійними магнітами з великою кількістю полюсів обмотка статора виконується двохшаровою з дробовим числом пазів на полюс і фазу. Для таких машин обмотковий коефіцієнт якоря становить близько 0,72.

$B_\delta$  повинно обиратися меншою від магнітної індукції  $B_r$  постійних магнітів. Так для рідкоземельних неодимових магнітів, що мають  $B_r = 1,23 \text{ Т}$ , рекомендується обирати  $B_\delta = 0,8 \dots 0,85 \text{ Т}$ .

Лінійне навантаження для синхронних машин до 100 кВт приймається згідно з рис. 2 у межах  $(1,4 \dots 2,2) \cdot 10^4 \text{ А/м}$ . Менші значення  $A$  відповідають меншим значенням  $\tau$ .

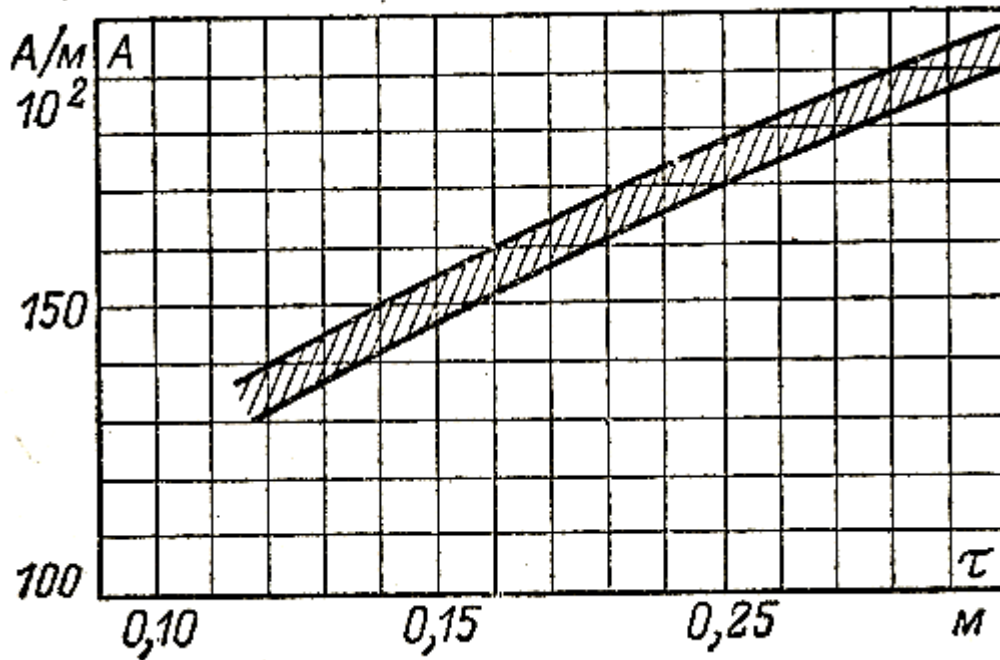


Рис. 2 До визначення лінійного струмового навантаження синхронного генератора

#### 4. Обмотка і магнітопровід якоря

Магнітний потік у межах полюсного поділку, утворований полюсом постійного магніту, дорівнює

$$\Phi_\delta = B_\delta \tau l_\delta \alpha_\delta$$

Нехтуючи насиченням ярма якоря при навантаженні, визначаємо ЕРС збудження за номінальної напруги як

$$E_f = k_E U_n = k_E \frac{U_{лн}}{\sqrt{3}}.$$

Кількість витків фази якоря (попереднє значення):

$$W_1 = \frac{E_f}{4k_B k_{of_H} \Phi_{\delta}}$$

Номинальний фазний струм якоря

$$I_H = \frac{P_H}{mU_H \cos \varphi}$$

Далі необхідно здійснити **вибір числа пазів якоря**. Одним з критеріїв цього вибору є допустима величина зубцевого поділку  $t_z$ . Для синхронних машин потужністю до 100 кВт  $t_z$  повинен знаходитись у межах від 8 до 20 мм. Тоді межі, у яких повинна знаходитись число пазів якоря становитиме

$$z = \frac{\pi D}{(0,02 \dots 0,008)} = z_{min} \dots z_{max}$$

Синхронні машини з постійними магнітами, що використовуються у вітроустановках і малих гідроагрегатах, обертаються з малою швидкістю. У разі необхідності отримання напруги стандартної для електричних мереж загального призначення частоти вони повинні мати значну кількість полюсів. Тому ці машини мають невелике значенням полюсного поділку.

З метою зменшення впливу скорочення кроку секцій на основну гармоніку магнітного поля і МРС і забезпечення суттєвого послаблення вищих гармонік в таких машинах як правило застосовуються двошарові петльові обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу  $q$ , яке виражається мішаним числом і може бути представлено як  $q = b + \frac{c}{d}$ , де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – цілі числа,  $b$  – ціла частина дробу,  $\frac{c}{d}$  його дробова частина,  $c < d$ . Виражаючи  $q$  як неправильний нескорочуваний дріб, маємо  $q = \frac{bd+c}{d} = \frac{N}{d}$ , де  $N$  – чисельник неправильного дробу. Для забезпечення симетрії трифазної обмотки слід обирати знаменник дробової частини  $d$  не рівний і не кратний 3 та менший  $2p$ . Звичайно обирають  $1\frac{1}{4} \leq q < 3$ .

Значення  $q$  повинно бути таким, щоб  $z = 2ptq$  було у межах  $z_{min} \dots z_{max}$ . Слід також врахувати, що необхідно забезпечити відносний крок секції  $\beta = y/\tau$ , де  $y$  і  $\tau$  виражено числами зубцевих поділків, у межах 0.8..0.86. Полюсний поділок виражається у зубцевих поділках як  $\tau = tq$ , крок секції повинен дорівнювати цілому числу зубцевих поділків.



Після цього слід перевірити виконання умови симетрії трифазної обмотки якоря:

$$\frac{2p}{d} = \text{ц. ч.};$$

$$\frac{z}{mt} = \text{ц. ч.};$$

$t$  - найбільший спільний дільник чисел  $z$  та  $p$ .

Якщо якась з умов симетрії не виконується, слід обрати інше значення  $q$  та визначити нові значення  $u$  у відповідності з вище зазначеною умовою, та знайти нове значення  $z$  і повторити перевірку умов симетрії.

Далі треба обрати **форму і розміри пазів та перерізу провідників обмотки якоря, розміри зубців, висоту ярма сердечника якоря і його зовнішній діаметр.**

При виборі провідників обмотки якоря густину струму для синхронних машин з самовентиляцією потужністю до 100 кВт приймають у межах  $J = (5 \dots 12)10^6 \text{ А/м}^2$ . Менші значення  $J$  відносяться до машин закритого виконання, а також машин більшої потужності. Площа перерізу проводів залежить також від обраного числа паралельних віток фазної обмотки  $a$ .

Число паралельних віток фази двошарової петльової обмотки при дробовому числі пазів на полюс і фазу повинно відповідати співвідношенню:

$$a = \frac{2p}{dk} = \text{ц. ч.} \quad (k = 1, 2, \dots),$$

найбільше можливе число паралельних віток відповідає значенню  $k = 1$ .

Площа поперечного перерізу ефективного провідника дорівнює

$$q_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{н}}}{aJ}$$

У машинах потужністю до 100 кВт використовуються всіпні якірні обмотки з круглого проводу, а також обмотки з проводу прямокутного поперечного перерізу. Всіпні обмотки технологічно простіші і дешевші, їх бажано використовувати, якщо ефективний провідник можна поділити на  $n_{\text{ел}} \leq 4$  елементарних провідників з площею поперечного перерізу міді  $q_{\text{ел}} \leq 2,27 \text{ мм}^2$  (що відповідає стандартному діаметру ізолюваного круглого проводу

$d_{\text{еліз}} \leq 1,785$  мм). З оглядом на це необхідно обирати число паралельних віток  $a$ .

Якщо площа поперечного перерізу ефективного провідника є такою, що для реалізації всипної обмотки потрібна більш значна кількість

Таблиця 1

Діаметр і площа поперечного перерізу круглих мідних емальованих проводів марок ПЕТВ і ПЕТ-155

Номінальний діаметр неізолюваного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного проводу, мм	Площа поперечного перерізу неізолюваного проводу, мм <sup>2</sup>	Номінальний діаметр неізолюваного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного проводу, мм	Площа поперечного перерізу неізолюваного проводу, мм <sup>2</sup>
0,08	0,10	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,10	0,122	0,00785	0,60	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
0,14	0,162	0,01539	0,71	0,77	0,396
0,15	0,18	0,01767	0,75	0,815	0,442
0,16	0,19	0,0201	0,80	0,865	0,503
0,17	0,20	0,0227	0,85	0,915	0,567
0,18	0,21	0,0255	0,90	0,965	0,636
(0,19)	0,22	0,0284	0,95	1,015	0,709
0,20	0,23	0,0314	1,00	1,08	0,785
(0,212)	0,242	0,0353	1,06	1,14	0,883
0,224	0,259	0,0394	1,12	1,20	0,985
(0,236)	0,271	0,0437	1,18	1,26	1,094
0,25	0,285	0,0491	1,25	1,33	1,227
(0,265)	0,300	0,0552	1,32	1,405	1,368
0,28	0,315	0,0616	1,40	1,485	1,539
(0,30)	0,335	0,0707	1,50	1,585	1,767
0,315	0,350	0,0779	1,60	1,685	2,011
0,335	0,370	0,0881	1,70	1,785	2,27
0,355	0,390	0,0990	1,80	1,895	2,54
0,375	0,415	0,1104	1,90	1,995	2,83
0,40	0,44	0,1257	2,00	2,095	3,14
0,425	0,465	0,1419	2,12	2,22	3,53
0,45	0,49	0,1590	2,24	2,34	3,94
(0,475)	0,515	0,1772	2,36	2,46	4,36
0,50	0,545	0,1963	2,50	2,60	4,91

**Примітки:** 1. Проводи, розміри яких зазначені в дужках, варто застосовувати тільки в окремих випадках при обґрунтуванні техніко-економічної доцільності;

2. Середнє значення діаметра ізолюваного проводу обчислено з обліком розрахункової середньої двосторонньої товщини емалевої ізоляції, прийнятої як округлене середнє арифметичне з мінімальної й максимальної товщини.

Таблиця 2

## Розміри й площа поперечного перерізу дроту прямокутного перетину

Номинальний розмір дроту по більшій стороні, мм	Номинальний розмір дроту по меншій стороні, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Розрахунковий перетин дроту, мм <sup>2</sup>																	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	–	–	–	–	–	–	–
2,12	1,559	–	1,734	–	1,905	–	2,160	–	2,435	–	2,753	–	–	–	–	–	–	–
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	–	–	–	–	–
2,36	1,751	–	1,950	–	2,145	–	2,429	–	2,735	–	3,089	–	3,561	–	–	–	–	–
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	–	–	–
2,65	1,983	–	2,211	–	2,435	–	2,753	–	3,098	–	3,495	–	4,025	–	4,407	–	–	–
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	–
3,00	2,263	–	2,526	–	2,758	–	3,145	–	3,535	–	3,985	–	4,585	–	5,038	–	5,638	–
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	–	2,841	–	3,135	–	3,537	–	3,973	–	4,475	–	5,145	–	5,667	–	5,937	–
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,337	7,163
3,75	2,863	–	3,201	–	3,535	–	3,985	–	4,473	–	5,035	–	5,785	–	6,387	–	7,137	–
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	–	3,651	–	4,035	–	4,545	–	5,098	–	5,735	–	6,585	–	7,287	–	8,137	–
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	–	4,101	–	4,535	–	5,105	–	5,723	–	6,435	–	7,385	–	8,188	–	9,137	–
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	4,103	–	4,596	–	5,085	–	5,721	–	6,410	–	7,205	–	8,265	–	9,177	–	10,24	–
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,00	4,663	–	5,226	–	5,785	–	6,505	–	7,285	–	8,185	–	9,385	–	10,44	–	11,64	–
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,70	–	–	5,856	–	6,485	–	7,289	–	8,160	–	9,165	–	10,51	–	11,70	–	13,04	–
7,10	–	–	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,50	–	–	–	–	7,285	–	8,185	–	9,160	–	10,29	–	11,79	–	13,14	–	14,64	–
8,00	–	–	–	–	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,50	–	–	–	–	–	–	9,305	–	10,41	–	11,69	–	13,39	–	14,94	–	16,64	–

Номінальний розмір дроту по більшій стороні, мм	Номінальний розмір дроту по меншій стороні, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Розрахунковий перетин дроту, мм <sup>2</sup>																	
9,00	–	–	–	–	–	–							14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,50	–	–	–	–	–	–	–	–	11,66	–	13,09	–	14,99	–	16,74	–	18,64	–
10,0	–	–	–	–	–	–	–	–	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	14,63	–	16,75	–	18,72	–	20,84	–
11,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38
11,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	18,67	–	20,88	–	23,24	–
12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Номінальний розмір дроту по більшій стороні, мм	Номінальний розмір дроту по меншій стороні, мм																	
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,80	3,0	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	
	Розрахунковий перетин дроту, мм <sup>2</sup>																	
2,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,24	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,36	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,15	6,693	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,35	7,141	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,55	7,589	7,829	8,326	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,75	8,037	–	8,826	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,00	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Номинальний розмір дроту по більшій стороні, мм	Номинальний розмір дроту по меншій стороні, мм																
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,80	3,0	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Розрахунковий перетин дроту, мм <sup>2</sup>																
4,25	9,157	–	10,08	–	11,35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,50	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,75	10,28	–	11,33	–	12,75	–	14,41	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	–	–	–	–	–	–	–	–
5,30	11,51	–	12,70	–	14,29	–	16,15	–	18,27	–	–	–	–	–	–	–	–
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	–	–	–	–	–	–
6,00	13,08	–	14,45	–	16,25	–	18,35	–	20,75	–	23,14	–	–	–	–	–	–
6,30	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	–	–	–	–
6,70	14,65	–	16,20	–	18,21	–	20,56	–	23,24	–	25,94	–	29,29	–	–	–	–
7,10	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	–	–
7,50	16,44	–	18,20	–	20,45	–	23,08	–	26,08	–	29,14	–	32,89	–	36,64	–	–
8,00	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	18,68	–	20,70	–	23,25	–	26,23	–	29,63	–	33,14	–	37,39	–	41,64	–	46,74
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	20,92	–	23,20	–	26,05	–	29,38	–	33,18	–	37,14	–	41,89	–	46,64	–	52,34
10,0	22,04	23,05	28,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	23,38	–	25,95	–	29,13	–	32,84	–	37,08	–	41,54	–	46,84	–	52,14	–	58,50
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	26,07	–	28,95	–	32,49	–	36,62	–	41,34	–	46,34	–	52,24	–	52,14	–	65,22
12,5	27,64	24,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Продовження таблиці 2

Номинальний розмір дроту по більшій стороні, мм	Номинальний розмір дроту по меншій стороні, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,80	4,00	4,10	4,25	4,40	4,50	4,70	4,75
	Розрахунковий перетин дроту, мм <sup>2</sup>												
10,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11,2	–	36,97	–	39,21	41,14	–	43,94	–	46,74	–	49,54	–	52,34
11,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11,8	–	–	–	41,34	–	–	46,34	–	–	–	52,24	–	–
12,5	–	41,33	–	43,83	46,02	–	49,14	–	52,27	–	55,39	–	58,52
13,2	–	–	–	46,31	–	–	51,94	–	–	–	58,54	–	–
13,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14,0	–	46,35	–	49,15	51,95	–	55,14	–	58,64	–	62,14	–	65,64
14,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
15,0	–	–	–	52,70	–	–	59,14	–	–	–	66,64	–	–
15,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16,0	–	53,05	–	56,25	59,14	–	63,14	–	67,14	–	71,14	–	75,14
16,8	54,62	–	58,82	–	–	63,36	–	68,02	–	73,06	–	78,10	–
18,0	58,56	–	63,06	–	–	67,92	–	72,94	–	78,34	–	83,74	–
19,5	63,48	–	68,35	–	–	73,62	–	79,09	–	84,94	–	90,79	–
20,0	–	–	–	–	–	–	79,52	–	–	–	–	–	–
22,0	71,68	–	77,18	–	–	83,12	–	89,34	–	95,94	–	102,54	–
25,0	81,52	–	87,77	–	–	94,52	99,52	101,64	–	109,14	–	116,40	–
26,3	–	–	92,36	–	–	99,46	–	106,97	–	114,86	–	122,75	–
28,0	–	–	–	–	–	105,92	111,94	113,97	–	122,34	–	130,74	–
30,0	–	–	–	–	–	113,52	119,52	122,14	–	131,14	–	140,14	–
32,0	–	–	–	–	–	–	–	130,34	–	139,94	–	149,54	–
35,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	153,14	–	163,64	–

ЗНомінальний розмір дроту по більшій стороні, мм	Номінальний розмір дроту по меншій стороні, мм												
	5,00	5,10	5,30	5,50	5,60	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,5
	Розрахунковий перетин дроту, мм <sup>2</sup>												
10,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	94,34	–	–	–
11,2	55,14	–	58,50	–	61,86	–	–	–	–	–	–	–	–
11,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	103,54	–	–	–
11,8	58,14	–	–	–	65,22	–	–	–	–	–	–	–	–
12,5	61,64	–	65,39	–	69,14	–	–	–	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	–	–	–	73,06	–	–	–	–	–	–	–	–
13,5	–	–	–	–	–	–	–	93,64	107,14	120,64	–	–	–
14,0	69,14	–	73,34	–	77,54	–	–	–	–	–	–	–	–
14,5	–	–	–	–	–	–	93,39	100,64	115,14	129,64	–	–	–
15,0	74,14	–	–	–	83,14	–	–	–	–	–	–	–	–
15,6	–	–	–	–	–	–	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	–	–
16,0	79,14	–	83,94	–	88,74	94,14	–	–	127,14	–	–	–	–
16,8	–	84,82	–	91,54	–	99,94	108,34	116,74	133,54	–	–	–	–
18,0	–	90,94	–	98,14	–	107,14	116,14	125,14	143,14	–	–	–	–
19,5	–	98,59	–	106,39	–	116,14	125,89	135,64	155,14	–	–	–	–
20,0	99,14	–	–	–	–	119,14	–	–	159,14	–	–	–	–
22,0	–	111,34	–	120,14	–	131,14	142,14	153,14	–	–	–	–	–
25,0	124,14	126,64	–	136,64	–	149,14	161,64	174,14	–	–	–	–	–
26,3	–	133,27	–	143,79	–	158,94	170,09	183,24	–	–	–	–	–
28,0	–	141,94	–	153,14	–	167,14	181,14	195,14	–	–	–	–	–
30,0	149,14	152,14	–	164,14	–	–	–	–	–	–	–	–	–
32,0	–	162,34	–	175,14	–	–	–	–	–	–	–	–	–

**Примітка** Дріт з розмірами, розташованими в межах зверху й знизу жирної лінії ( ——— ), може виготовлятися у вигляді обмотувального проводу марок ПЕТВП і ПЕТП–155 з нагрівостійкою високоміцною емалевою ізоляцією; у межах тонкої лінії ( ————— ), – марок ПСД і ПСДК із ізоляцією з безлугового скловолокна з підклеюванням і просоченням нагрівостійким або кремнійорганічним лаком; у межах пунктирної лінії ( - - - - - ), – марки ПСДКТ із уточненою ізоляцією з безлугового скловолокна з підклеюванням і просоченням кремнійорганічним лаком.

## Максимальна товщина ізоляції обмотувальних проводів

Марка проводу	Двостороння товщина ізоляції															
	при діаметрах голого проводу $d$ , мм														прямокутного проводу при меншій стороні перетину голого проводу, мм	
	0,05 – 0,09	0,10 – 0,19	0,20 – 0,25	0,265 – 0,30	0,315 – 0,355	0,375 – 0,50	0,53 – 0,71	0,75 – 0,95	1,00 – 1,40	1,50 – 1,60	1,70 – 2,12	2,24 – 5,00	5,00 – 5,20	0,85 – 1,9	2,12 – 3,75	4,0 – 5,6
ПБД	–	–	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,23	0,44
АПБД	–	–	–	–	–	–	–	–	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,23	0,44
ПЕЛБО	–	–	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	0,21	–	–	–	–	–
ПЕЛШО, ПЕЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	0,155	–	–	–	–	–
ПСД, ПСДК	–	–	–	–	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,40
ПСДТ	–	–	–	–	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,23	–	–	–	–	–
ПСДКТ	–	–	–	–	0,14	0,14	0,16	0,16	0,18	0,18	–	–	–	0,22	–	–
ПДА	–	–	–	–	–	–	–	–	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40
ПЕВП, ПЕМП, ПЕВППИ, ПЕТВП, ПЕТ – 155	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1– 0,12	0,15	–
ППТБО, ППЛБО	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,45	0,45	0,50



елементарних провідників, застосовують провід прямокутної форми перерізу. В обмотках з прямокутного проводу кількість елементарних провідників обирають, виходячи з того, що площа поперечного перерізу прямокутного елементарного провідника не повинна перевищувати 18 -20 мм<sup>2</sup>. В обмотках з прямокутних провідників у разі відкритих пазів число елементарних провідників, як правило, один або два по ширині паза. У разі напіввідкритих пазів воно повинно бути рівним двом.

### ***Кількість ефективних провідників у пазу якоря***

$$u_{\text{п}} = t_z a A / I_{\text{н}},$$

де  $t_z = \frac{\pi D}{z}$ , м - зубцевий поділок внутрішнього кола якоря.

Отримане значення  $u_{\text{п}}$  округлюється до найближчого парного цілого числа, враховуючи, що при двошаровій обмотці воно повинно бути парним.

***Уточнені значення*** лінійного навантаження, числа витків фази, магнітного потоку та магнітної індукції у зазорі:

$$A = \frac{z u_{\text{п}} I_{\text{н}}}{\pi D a}, \quad w_1 = \frac{u_{\text{п}} q p}{a}, \quad \Phi_{\delta} = \frac{E_f}{4 k_B k_{of} w_1}, \quad B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\tau l_{\delta} \alpha_{\delta}}.$$

***Марка ізолюваних провідників*** обирається у відповідності з класом нагрівостійкості. ***Їх стандартні розміри*** обираються так, щоб площа поперечного перерізу неізолюваного провідника була якомога ближчою до розрахункового значення  $q_{\text{ел}}$ .

Діаметр круглого ізолюваного провідника повинен бути не більше 1,8 мм.

Прямокутний провід з метою зменшення впливу ефекту витіснення струму розташовують у пазу так, щоб більша сторона  $b$  перерізу проводу була паралельна дну паза. Розмір такого проводу по висоті повинен бути у межах  $1 \text{ мм} \leq a \leq 3,5 \text{ мм}$ . Небажано, щоб розміри  $a$  і  $b$  були близькі один до одного, з метою запобігання перекручування проводу при намотці.

Стандартні розміри проводів наведені у табл.1 та 2, максимальна товщина ізоляції обмотувальних проводів – у табл.3.

***Розміри зубцевої зони сердечника статора*** визначаються вимогами до величини магнітної індукції у зубцях і розташуванням секцій обмотки у пазах.

У разі всипної обмотки звичайно застосовуються пази трапецеїдальної форми, за яких зубець має постійну ширину по всій його висоті за винятком незначної частини у його головки. Ширину зубця розраховують за виразом:

$$b_z = \frac{B_{\delta} t_z}{B_z k_c},$$

де допустима індукція у зубці  $B_z = 1,55 - 1,85$  Т.

Площа, необхідна для розміщення у пазу ізольованих провідників обмотки розраховують як

$$S'_\Pi = \frac{u_\Pi n_{\text{ел}} d_{\text{ел}}^2}{k_3},$$

де  $k_3 = 0,68 \dots 0,74$  – коефіцієнт заповнення паза провідниками.

Повна площа паза враховує площу для розташування пазової ізоляції, двосторонню товщину якої по ширині і висоті паза можна прийняти рівною 0,6 мм, прокладок, товщина яких по висоті дорівнює 1 мм, та клина з кутом нахилу горизонталі  $30^\circ$ . Висота шлиця  $h_{\text{ш}} = (0,7 \dots 1)$  мм, ширина шлиця  $b_{\text{ш}} = d_{\text{ел}} \text{із} + (1,5 \dots 2)$ , мм.

Розміри паза встановлюють графічним методом, накресливши у масштабі один зубцевий поділок, нанісши зубці та визначивши висоту паза, за якої забезпечується розташування у ньому провідників, пазової ізоляції, ізоляційних прокладок та клина (рис. 3).

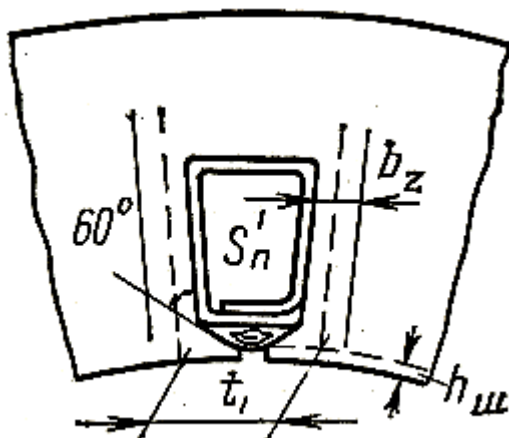


Рис 3. До визначення розмірів напівзакритого паза для розташування секцій всипної обмотки якоря

Для обмотки з прямокутного проводу використовуються відкриті або напіввідкриті пази з паралельними стінками. У машинах до 100 кВт застосовуються переважно напівжорсткі секції, які укладаються у напіввідкриті пази.

Попередньо ширину паза може бути вибрано у діапазоні  $b_\Pi = (0,4 \dots 0,5)t_z$ . Сумарна ширина ізольованих провідників  $b'_{\text{із}} = b_\Pi - \delta_{\text{п із}}$ , де  $\delta_{\text{п із}}$  – сумарна пазова і котушкова ізоляція по ширині паза, яку для низьковольтних машин з напіввідкритими пазами може бути прийнято рівною 2,2 мм. Сумарна ізоляція по

висоті паза становить 4,5 мм. Ширина шлиця напіввідкритого пазу пазу  $b_{ш} = 0,5b_{п} + (1,0 \dots 1,5)$  мм. Висота шлиця  $h_{ш} = 0,5 \dots 0,8$  мм, клина  $h_{к} = 2,5 \dots 3,5$  мм. Ширина ізолюваного провідника

$$b_{із} = 0,5b'_{із}$$

Ширина неізолюваного провідника  $b = 0,27 \dots 0,4$  мм (зростає при збільшенні розмірів проводу).

Виходячи з викладеного уточнюються розміри неізолюваного та ізолюваного проводу та визначається висота паза  $h_{п}$ .

Після цього перевіряється максимальна магнітна індукція у зубці за формулою:

$$B_{z \max} = \frac{B_{\delta} t_z}{(t_z - b_{п}) k_c},$$

Вона повинна становити 1,6 .. 2 Т. У разі необхідності уточнюються розміри зубця, пазу, і проводу та визначається нове значення  $B_{z \max}$ .

Знаходять **висоту ярма якоря**

$$h_a = \frac{\alpha_{\delta} B_{\delta} \tau}{2B_a k_c},$$

Значення  $B_a$  повинно знаходитись у межах (1,2 .. 1,45) Т.

**Зовнішній діаметр сердечника якоря** знаходять як

$$D_a = D + 2h_{п} + 2h_a.$$

## 5. Активний опір та індуктивний опір розсіювання якоря

**Активний опір фази якоря**

$$R = \rho_{\theta} \frac{l_{сер} w_1}{n_{ел} q_{ел} a},$$

$\rho_{\theta}$  – питомий опір міді за робочої температури, для ізоляції класу В робочу температуру може бути прийнято 115 °С,  $\rho_{\theta} = 2,13 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;

$l_{сер}$  – середня довжина витку, м.

Середня довжина витку знаходиться як

$$l_{сер} = 2(l_{п} + l_{л}),$$

де  $l_{п}$  – довжина пазової частини,  $l_{п} = l_{\delta}$ ;  $l_{л}$  – довжина лобової частини.

При значному числі полюсів  $l_{л}$  становить (усі розміри у м):

- для всипної обмотки

$$l_{л} = 1.5b_c + 0.02$$

- для обмотки з прямокутного проводу

$$l_{л} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{b+0,0035}{t_z}}} b_c + 0.025 + h_{п},$$

де  $b$  – ширина міді у лобовій частині.

Ширина секції, м,

$$b_c = \frac{\pi(D+h_{п})}{2p} \beta.$$

Виліт лобових частин обмотки становить (усі розміри у м):

- для всипної обмотки

$$l_{вил} = 0,5b_c + 0,01,$$

- для обмотки з прямокутного проводу

$$l_{вил} = 0,5 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{b+0,0035}{t_z}}} b_c + 0,025 + h_{п}.$$

При подальших розрахунках знадобляться значення величини повітряного зазору та обмоткового коефіцієнту якірної обмотки.

**Величину повітряного зазору** можна вибрати на підставі виразу:

$$\delta = (0,25 + D)10^{-3}, \text{ м.}$$

Уточнене значення обмоткового коефіцієнту  $k_{об}$  для першої гармоніки, враховуючи скорочення кроку і розподілення обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу знаходимо як

$$k_{об} = k_{ск}k_p,$$

Де  $k_{ск}$  і  $k_p$  коефіцієнти відповідно скорочення і розподілення:

$$k_{ск} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right),$$

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{N \sin \frac{\pi}{2mN}}.$$

**Індуктивний опір розсіювання обмотки якоря** обчислюють за формулою:

$$X_\sigma = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq} (\lambda_{п} + \lambda_{л} + \lambda_{д}),$$

де  $\lambda_{п}$ ,  $\lambda_{л}$ ,  $\lambda_{д}$  коефіцієнти магнітної провідності відповідно пазового, лобового та диференціального розсіювання.

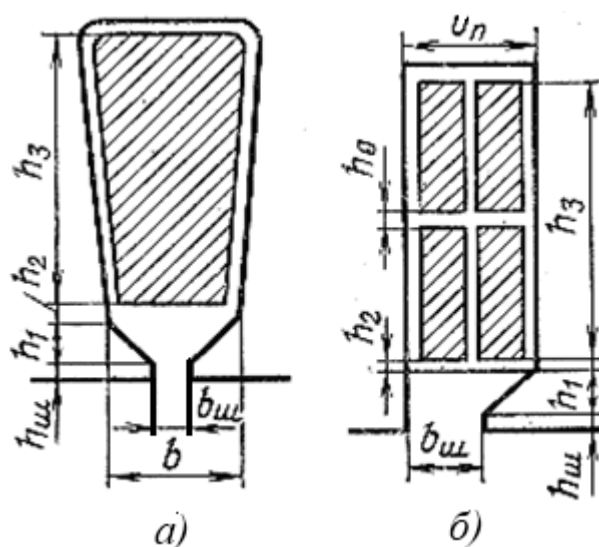


Рис.4 До розрахунку коефіцієнтів магнітної провідності пазів якоря: а) напівзакритий паз, б) напіввідкритий паз

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання для всипної обмотки, закладеної у трапецеїдальні пази, дорівнює

$$\lambda_{\Pi} = \frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left( \frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta},$$

для обмотки з прямокутного проводу, закладеної у напіввідкриті пази

$$\lambda_{\Pi} = \frac{h_3-h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \left( \frac{h_2}{b_{\Pi}} + \frac{3h_1}{b_{\Pi}+b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_{\beta}.$$

У цих формулах розміри паза визначаються, як вказано на рис. 4. Коефіцієнти:

$$k'_{\beta} = 0,25(3\beta + 1) - \text{(при } \frac{2}{3} < \beta < 1),$$

$$k'_{\beta} = 0,25(6\beta - 1) - \text{(при } \frac{1}{3} < \beta < \frac{2}{3}),$$

$$\beta = y/\tau,$$

$$k_{\beta} = 0,25(3k'_{\beta} + 1).$$

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання:

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \frac{q}{l_{\delta}} (l_{\text{л}} - 0,64\beta\tau).$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання:

$$\lambda_{\text{д}} = \frac{t_z}{12\delta k_{\delta}} \xi,$$

де коефіцієнт повітряного зазору

$$k_{\delta} = \frac{t_z}{t_z - \gamma\delta};$$

$$\gamma = \frac{(b_{\text{ш}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{ш}}\delta};$$

параметр  $\xi$  визначається за виразами, що залежать від числа пазів на полюс і фазу та кроку обмотки:

- у разі цілого  $q \geq 2$   
при  $y = \tau$ :  $\xi = 2 + 0,022q^2 - k_{об}^2(1 + \Delta_z)$ ,

при  $y < \tau$ :  $\xi = k''q^2 + 2k'_\beta - k_{об}^2(1 + \Delta_z)$ ;

- у разі дробового числа пазів на полюс і фазу  
при  $q > 2$ :  $\xi = k''q^2 + 2k''_\beta - k_{об} \left( \frac{1}{d^2} + \Delta_z \right)$ ,

при  $1 < q < 2$ :  $\xi = k''q^2 + 2k''_\beta - \frac{k'}{q} - k_{об} \left( \frac{1}{d^2} + \Delta_z \right)$ .

У наведених формулах параметри  $\Delta_z$ ,  $k'$ ,  $k''$ ,  $k''_\beta$  визначаються за допомогою графіків, наведених на рис. 5, а – д. Параметр  $k'_\beta$  визначається за тими ж виразами, що й при підрахунку коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання.

## 6. Визначення розмірів ротора

**Зовнішній діаметр ротора** визначається уявним колом, на якому розташовано лінію, яка обмежує поверхню полюсів (постійних магнітів) обернену до внутрішньої поверхні сердечника якоря, і дорівнює

$$D_p = D - 2\delta.$$

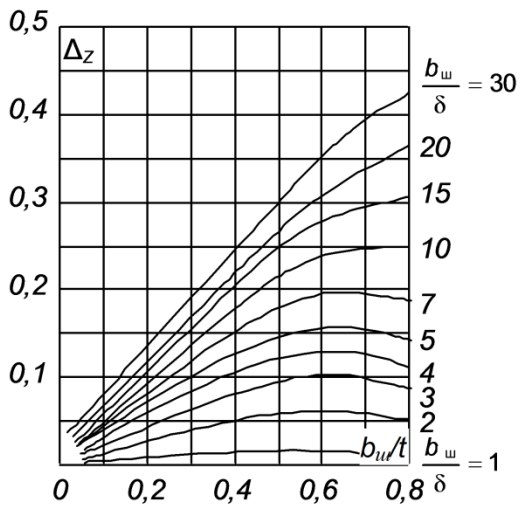
З метою зменшення магнітного потоку розсіювання полюсів мінімальна відстань між ними, яка визначається на рівні зовнішнього кола втулки ротора, повинна бути  $\Delta_{min} = 5 \dots 10$  мм.

**Ширина постійного магніту** полюса

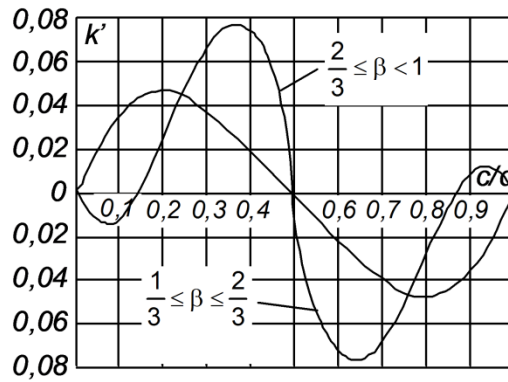
$$b_M = \alpha_\delta \tau.$$

Виходячи з цього, **висота постійного магніту** у радіальному напрямку обирається у межах

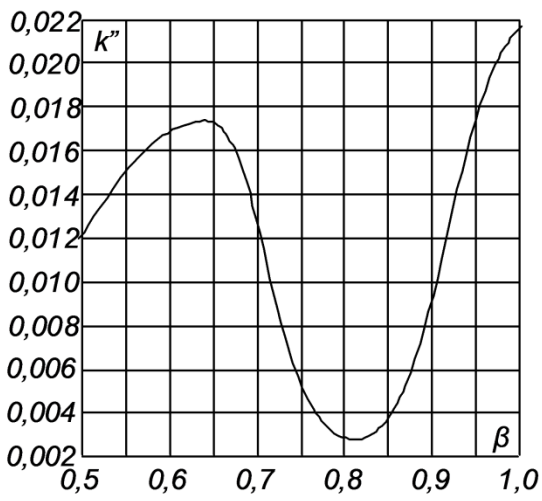
$$h_M = \frac{D_p}{2} - \frac{p(b_M + \Delta_{min})}{\pi} = h_{Mmin} \dots h_{Mmax}.$$



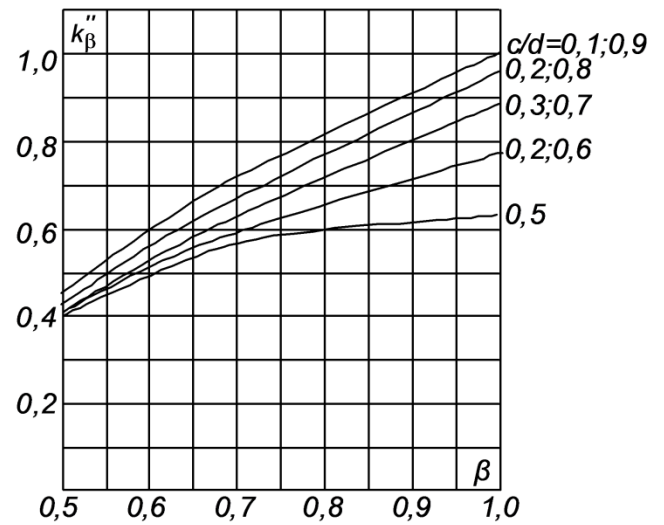
a)



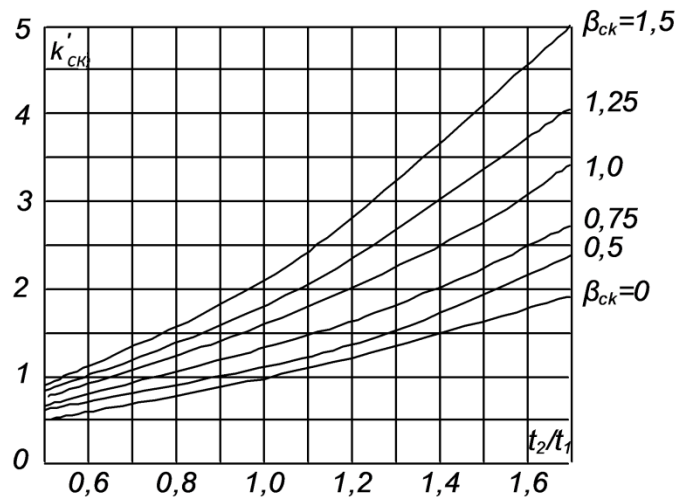
б)



в)



г)



д)

Рис. 5 Графіки до розрахунку коефіцієнта магнітної провідності диференціального розсіювання



*Довжина магніту в осьовому напрямку* приймається  $l_M = l_\delta$ .

*Зовнішній діаметр втулки ротора*, яка є частиною магнітного кола і виготовляється з електротехнічної сталі, визначається як

$$D_{j1} = D_p - 2h_M.$$

Внутрішній діаметр втулки ротора  $D_{j2}$  буде визначено при подальшому розрахунку.

Розміри ротора позначені на рис. 6.

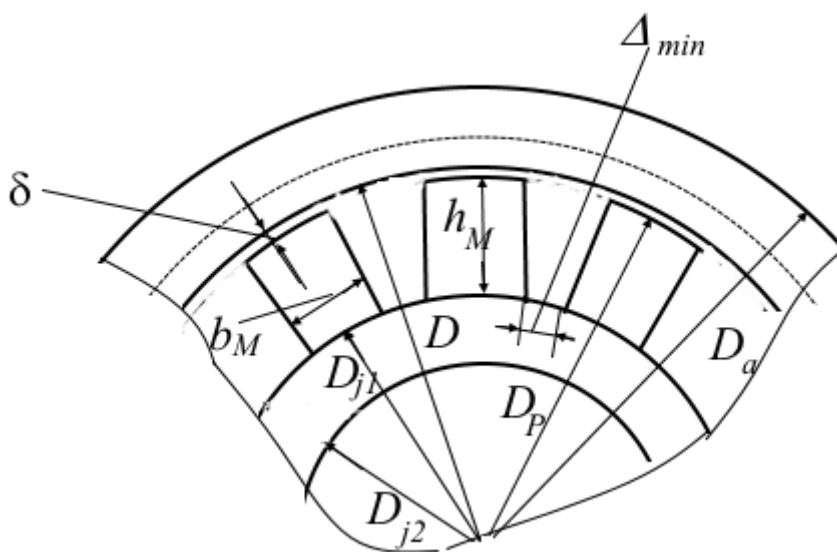


Рис. 6 Основні розміри ротора

## 7. Індуктивні опори реакції якоря

*Головні індуктивні опори реакції якоря по поздовжній і поперечній осям* розраховують за виразами:

$$X_{ad} = \frac{2mfw_1k_{06}^2}{p} \Lambda_{ad},$$

$$X_{aq} = \frac{2mfw_1k_{06}^2}{p} \Lambda_{aq}.$$

У цих виразах  $\Lambda_{ad}$  і  $\Lambda_{aq}$  – магнітні провідності генератора по поздовжній та поперечній осях відповідно, які обчислюються за формулами :

$$\Lambda_{ad} = \frac{1}{R_{ad}} = \frac{\Lambda_{\delta d}(\Lambda_{\sigma M} + \Lambda_M)}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{\sigma M} + \Lambda_M},$$

$$\Lambda_{aq} = \frac{1}{R_{aq}} = \Lambda_{\delta q},$$

де  $\Lambda_{\delta d}$ ,  $\Lambda_{\sigma M}$ ,  $\Lambda_M$ ,  $\Lambda_{\delta q}$  – магнітні провідності повітряного зазору для поздовжнього магнітного потоку  $\Phi_{\delta d}$ , розсіювання ротору на один полюс, полюсу магніту по поздовжній осі, повітряного зазору для потоку  $\Phi_{\delta q}$  відповідно.

Вказані магнітні провідності дорівнюють:

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\Phi_{\delta d}}{F_{\delta dm}} = \frac{2k_d k_{fd} \mu_0 \tau l_\delta}{\pi \delta k_\delta},$$

$$\Lambda_{\sigma M} = \frac{4}{\pi} \mu_0 [p l_M + b_M \sin(\frac{\pi}{2p}) + 0,5 h_M],$$

$$\Lambda_M = \mu_B b_M l_M / h_M,$$

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{\Phi_{\delta q}}{F_{\delta qm}} = \frac{2k_q k_{fq} \mu_0 \tau l_\delta}{\pi \delta k_\delta},$$

де коефіцієнти визначаються за формулами:

$$k_d = \frac{\alpha_\delta \pi + \sin \alpha_\delta \pi}{\pi},$$

$$k_{fd} = \frac{\pi \sin(\frac{\alpha_\delta \pi}{2})}{\alpha_\delta \pi + \sin(\alpha_\delta \pi)},$$

$$k_q = \frac{\alpha_\delta \pi - \sin \alpha_\delta \pi}{\pi},$$

$$k_{fq} = \frac{\pi [1 - \cos(\frac{\alpha_\delta \pi}{2})]}{\alpha_\delta \pi - \sin \alpha_\delta \pi},$$

$$k_M = \frac{4 \sin(\frac{\alpha_\delta \pi}{2})}{\pi},$$

$$k_{fM} = \frac{\alpha_{\delta}\pi^2}{8 \sin\left(\frac{\alpha_{\delta}\pi}{2}\right)}.$$

*Повні (синхронні) індуктивні опори по поздовжній та поперечній осях визначаються як*

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

## 8. Розрахунок магнітного кола генератора

Розрахунок магнітного кола виконується з метою *визначення МРС постійних магнітів на один полюс  $F_M$*  у режимі холостого ходу генератора. Відповідно до закону повного струму  $F_M$  за відсутністю струму якоря дорівнює сумі МРС (магнітних напруг) зовнішньої до постійного магніту частини магнітного кола машини, узятій з протилежним знаком:

$$F_M = -(F_{\delta} + F_z + F_{da} + F_{ст} + F_j),$$

де  $F_{\delta}$ ,  $F_z$ ,  $F_{ст}$ ,  $F_{da}$  і  $F_j$  - магнітна напруга на ділянках відповідно повітряного зазору, зубців якоря, стиках між постійним магнітом і втулкою ротора, ярма якоря та втулки ротора.

Знак мінус у наведеному рівнянні вказує на те, що робоча точка постійного магніту знаходиться на так званій лінії повернення, яка для рідкоземельних магнітів співпадає з кривою розмагнічування, що має вигляд прямої, яка з'єднує точки на осях з координатами  $(0; B_r)$   $(H_c; 0)$ , де  $B_r$  - остаточна магнітна індукція,  $H_c$  - коерцитивна сила.

Магнітна напруга на ділянці повітряного зазору з урахуванням насичення сталевих ділянок магнітного кола сердечника якоря (у першу чергу зубцевої зони) дорівнює

$$F_{\delta\mu} = 0,8B_{\delta} \delta k_{\delta} k_{\mu} 10^6, \text{ А},$$

де  $k_\mu = 1,1 \dots 1,3$  - коефіцієнт насичення магнітного кола по поздовжній осі.

У разі пазів з паралельними стінками розрахункову магнітну індукцію у зубці визначимо як індукцію у зубці у його перерізі на відстані  $1/3$  його висоти від рівня перерізу зубця з найменшою площею. Відгалуження частини потоку зубця в область пазів враховувати не будемо. Розрахункову ширину зубця знаходимо як

$$b_z = \frac{\frac{\pi(D+2h_n)}{z} - b_n + 2b_{zmin}}{3},$$

$$\text{де } b_{zmin} = \frac{\pi(D+2h_k)}{z} - b_n.$$

У разі всипної обмотки без урахування відгалуження магнітного потоку індукція у перерізах зубця по всій його висоті однакова. Розрахункова ширина зубця у цьому разі дорівнює ширині зубця  $b_z$ , яку було знайдено при визначенні розмірів зубцевої зони.

Розрахункова магнітна індукція у зубці знаходиться як

$$B_z = \frac{B_\delta t_z}{b_z k_c}.$$

Вибравши для магнітопроводу якоря і втулки ротора марку електротехнічної сталі (рекомендуються марки тонколистової ізотропної холоднокатаної сталі 2013, 2312, 2411) знаходять напруженість магнітного поля у зубці  $H_z$ , користуючись кривою намагнічування сталі для зубців (табл. 4 – 9). Магнітна напруга зубців дорівнює

$$F_z = H_z h_z, \quad (h_z = h_n).$$

Довжина середньої лінії напруженості магнітного поля на ділянці ярма якоря

$$l_a = \frac{\pi(D+2h_n+h_a)}{4p}.$$

Магнітна напруга на ділянці ярма якоря

$$F_{da} = H_a l_a,$$

де  $H_a$  – напруженість магнітного поля на ділянці ярма якоря, яку знаходять по кривій намагнічування сталі для ярма по значенню магнітної індукції у ярмі

$$B_a = \frac{\Phi_{\delta}}{2l_{\delta}h_a k_c}.$$

### Криві намагнічування сталі 2013

Основна крива намагнічування

Таблиця 4

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H$ , А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1 000	1 130	1 240	1 350	1 460	1 580
1,6	1 700	1 860	2 020	2 180	2 340	2 500	2 700	2 800	3 000	3 200
1,7	3 400	3 700	4 000	4 300	4 700	5 000	5 400	5 800	6 200	6 600

<i>B</i> ,	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
<i>Tл</i>	<i>H</i> , А/м									
1,8	7 000	7 500	8 000	8 500	9 200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2,0	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000
2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	346 000	354 000	362 000

Таблиця 5

Крива намагнічування для ярма

<i>B</i> ,	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
<i>Tл</i>	<i>H</i> , А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726

1,6	750	788	826	864	902	940	982	1 020	1 070	1 110
1,7	1 150	1 220	1 290	1 360	1 430	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900
1,8	2 000	2 160	2 320	2 490	2 650	2 810	2 960	3 110	3 270	3 420
1,9	3 570	3 800	4 030	4 260	4 490	4 720	4 930	5 140	5 350	5 560
2,0	5 770	6 000	6 300	6 600	7 000	7 400	7 900	8 400	9 000	9 700

Таблиця 6

Крива намагнічування для зубців

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/м									
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1 110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1 480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2 010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3 020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4 920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8 470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13 800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21 400

### Криві намагнічування сталі марок 2211, 2212, 2214, 2312, 2411

Таблиця 7

#### Основна крива намагнічування

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235



1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1 000	1 060	1 120	1 180	1 240	1 300	1 360	1 420	1 480	1 540
1,5	1 600	1 750	1 900	2 050	2 200	2 350	2 500	2 700	2 900	3 100
1,6	3 400	3 600	3 800	4 100	4 400	4 700	5 300	5 900	6 500	7 100
1,7	7 700	8 200	8 900	9 400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600
2,0	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000

Таблиця 8

Крива намагнічування для ярма

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398

1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Таблиця 9

Крива намагнічування для зубців

$B, Tл$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, A/м$									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	870
1,4	897	917	936	955	977	1 000	1 020	1 040	1 060	1 090
1,5	1 120	1 150	1 170	1 210	1 240	1 270	1 310	1 330	1 370	1 410
1,6	1 450	1 490	1 530	1 560	1 610	1 650	1 690	1 750	1 790	1 840
1,7	1 900	1 940	2 000	2 070	2 140	2 220	2 300	2 380	2 500	2 600
1,8	2 700	2 800	2 920	3 050	3 220	3 330	3 490	3 610	3 710	4 000

1,9	4 160	4 350	4 600	4 800	5 030	5 330	5 430	5 790	6 130	6 420
2,0	6 750	7 170	7 400	7 790	8 150	8 520	9 000	9 400	9 750	10 200
2,1	10 600	11 000	11 500	12 100	12 600	13 000	13 500	14 100	14 700	15 400
2,2	15 900	16 500	17 300	17 800	18 500	19 100	19 600	20 300	21 100	22 000
2,3	23 100	24 300	25 500	26 800	28 100	29 500	30 900	32 400	33 900	36 400

Для визначення магнітної напруги на ділянці ярма ротора спочатку знаходимо внутрішній діаметр втулки ротора  $D_{j2}$ , прийнявши магнітну індукцію у ярмі ротора у межах  $B_j = (0,7.. 1.0)$  Т.

Магнітний потік у ярмі (втулці) ротора перевищує половину потоку у повітряному зазорі на величину половини потоку розсіювання постійного магніту  $\Phi_{\sigma M}$ . Потік  $\Phi_{\sigma}$  може бути розраховано як

$$\Phi_{\sigma M} = 0,5 (F_{\delta} + F_z + F_a) \Lambda_{\sigma M}.$$

#### *Коефіцієнт розсіювання магніту*

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{\sigma M}}{\Phi_{\delta}}.$$

#### *Висота ярма ротора*

$$h_j = \frac{\Phi_{\delta} \sigma}{2l_{\delta} B_j}.$$

#### *Внутрішній діаметр втулки ротора*

$$D_{j2} = D_{j1} - 2h_j.$$

Довжина ділянки ярма ротора

$$l_j = \frac{\pi(D_{j1} - h_j)}{4p}.$$

Напруженість магнітного поля на ділянці ярма ротора  $H_j$  визначається за допомогою кривої намагнічування обраної марки сталі при значенні магнітної індукції на ділянці  $B_j$ .

Магнітна напруга на ділянці ярма ротора

$$F_j = H_j l_j.$$

Для визначення магнітної напруги на ділянці стику між полюсом і втулкою ротора знаходимо магнітну індукцію на цій ділянці

$$B_{ст} = \frac{\Phi_{\delta} \sigma}{b_M l_{\delta}}.$$

Напруженість магнітного поля на ділянці стику

$$H_{ст} = 8 \cdot 10^5 B_{ст}.$$

Приймаючи повітряний зазор у стику магніту з втулкою ротора  $\delta_{ст} = 5 \cdot 10^{-5}$  м, знаходимо магнітну напругу на стику магніту з втулкою ротора на один полюс:

$$F_{ст} = H_{ст} \delta_{ст}.$$

## 9. Робоча діаграма магніту

Робоча діаграма постійного магніту є сукупність графічних залежностей магнітних потоків від МРС магніту та зовнішнього магнітного кола. При навантаженні враховується також вплив поздовжньої МРС якоря.

Постійні магніти із сплаву неодим-залізо-бор мають практично прямолінійну характеристику розмагнічування. Лінія повернення для них співпадає з характеристикою розмагнічування.

При побудові робочої діаграми використовуються крива розмагнічування постійного магніту і залежність магнітного потоку розсіювання магніту, розташованого у магнітному колі машини, від його МРС  $\Phi_{\sigma M} = f(F_M)$ .

Використання цих характеристик спільно з характеристикою зовнішнього по відношенню до магніту магнітного кола машини  $\Phi_{\delta} = f(F_M)$ , дозволяє знайти магнітний потік  $\Phi_{\delta}$  для різних значень поздовжньої складової МРС якоря  $F_d$ . За отриманими значеннями  $\Phi_{\delta}$  і  $F_d$  зможемо знайти залежність ЕРС збудження, яке забезпечується постійними магнітами, від поздовжньої складової струму якоря. Далі, базуючись на векторній діаграмі генератора, знаходиться зовнішня характеристику генератора, тобто залежність між напругою генератора і струмом якоря  $U = f(I)$  за умови  $\Omega = const, \cos \varphi = const$ .

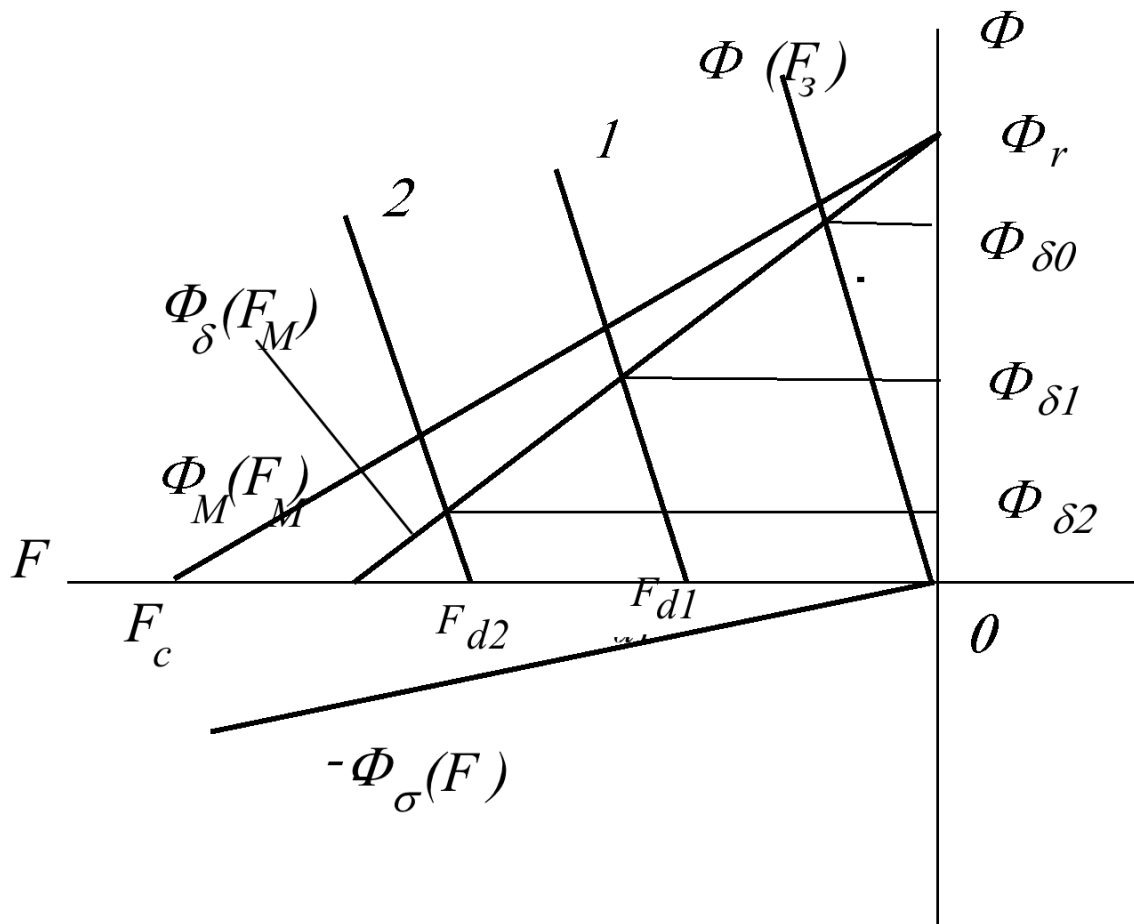


Рис.7 Робоча діаграма постійного магніту

Для побудови діаграми (рис. 7) неодимового постійного магніту  $\Phi_{\delta} = f(F_M)$  спершу необхідно побудувати графік залежності  $\Phi_M = f(F_M)$ , для чого розраховується залишковий магнітний потік постійного магніту

$$\Phi_r = B_r b_M l_{\delta}$$

і коерцитивна МРС

$$F_c = H_c h_M.$$

Значення  $B_r$  та  $H_c$  наведено у табл. 10. Марку неодимового магніту слід обирати, враховуючи робочу температуру магніту, яка повинна перевищувати робочу температуру генератора, в якому він застосовується.

Характеристика розмагнічування постійного магніту (рис. 7)  $\Phi_M = f(F_M)$  є пряма, що проходить через точки  $(-H_c, 0)$  та  $(0, \Phi_r)$ .

Далі побудуємо графік залежності магнітного потоку розсіювання магніту від його МРС  $\Phi_{\sigma M} = f(F_M)$ . Для цього необхідно провести пряму через початок

координат  $(0, 0)$  і точку  $(F_M, \Phi_{\sigma M})$ , яка є графіком залежності  $\Phi_{\sigma M} = f(F_M)$ .  
 Рекомендується графік потоку розсіювання побудувати у третьому квадранті як залежність  $-\Phi_{\sigma M} = f(F_M)$ , враховуючи, що для визначення магнітного потоку у повітряному зазорі необхідно потік розсіювання віднімати від потоку постійного магніту.

Таблиця 10

Характеристики магнітних сплавів NdFeB

Марка матеріалу	Залишкова магнітна індукція $B_r$		Коерцитивна сила $H_c$		Максимальний енергетичний добуток (BH) max.		Зщбча температура $t$
	Tl (Тесла)	kG (КГаусс)	kA/m	kOe	MGOe	Kj/m3	
N35	1,17-1,20	11,7-12,0	955	12	35	279	80
N35M	1,17-1,20	11,7-12,0	1115	14	35	279	100
N35H	1,15-1,17	11,5-11,7	1355	17	35	279	120
N35SH	1,17-1,20	11,7-12,0	1590	20	35	279	150
N35UH	1,17-1,20	11,7-12,0	1990	25	35	279	180
N38	1,17-1,20	12,2-12,6	955	12	38	303	80
N38M	1,22-1,26	12,2-12,6	1115	14	38	303	100
N38H	1,22-1,26	12,2-12,6	1355	17	38	303	120
N38SH	1,22-1,26	12,2-12,6	1590	20	38	303	160
N38UH	1,22-1,26	12,2-12,6	1990	25	38	303	180
N40	1,26-1,29	12,6-12,9	955	12	40	318	80
N40M	1,26-1,29	12,6-12,9	1115	14	40	318	100
N40H	1,26-1,29	12,6-12,9	1355	17	40	318	120
N40SH	1,26-1,29	12,6-12,9	1590	20	40	318	160
N40UH	1,26-1,29	12,6-12,9	1990	25	40	318	180
N42	1,30-1,33	13,0-13,3	955	12	42	334	80
N42M	1,30-1,33	13,0-13,3	1115	14	42	334	100
N42H	1,30-1,33	13,0-13,3	1355	17	40	318	120
N42SH	1,3-1,33	13,0-13,3	1590	20	42	334	160
N45	1,33-1,37	13,3-13,7	955	12	45	358	80
N45M	1,33-1,37	13,3-13,7	1115	14	45	358	100
N45H	1,33-1,37	13,3-13,7	1355	17	45	358	120
N48	1,36-1,42	13,6-14,2	955	12	48	382	80
N48M	1,36-1,42	13,6-14,2	1115	14	48	382	100
N48H	1,36-1,42	13,6-14,2	1355	17	48	382	120
N50	1,41-1,45	14,1-14,5	876	11	50	398	70

Після цього будемо графік залежності магнітного потоку у повітряному зазорі від МРС постійного магніту як

$$\Phi_{\delta} = \Phi_M + (-\Phi_{\sigma M}) = f(F_M).$$

Користуючись результатами розрахунку магнітного кола генератора при холостому ході, будемо характеризувати намагнічування зовнішнього по відношенню до постійного магніту кола як пряму  $\Phi_{\delta} = f(F_3)$ , яка проходить через точки  $(0, 0)$  та  $(F_3, \Phi_{\delta})$ . Вона визначає залежність магнітного потоку у повітряному зазорі від сумарної МРС усіх ділянок зовнішнього кола.

Координатами точки перетину графіку  $\Phi_{\delta} = f(F_M)$  і характеристики намагнічування зовнішнього кола  $\Phi_{\delta} = f(F_3)$  є значення МРС постійного магніту  $F_{M0}$  та магнітного потоку у повітряному зазорі  $\Phi_{\delta 0}$  за відсутності струму якоря. Для врахування насичення магнітного кола слід використовувати значення МРС  $F_3 = F_M$ , отримане з врахуванням насичення (шляхом використання значення магнітної напруги повітряного зазору  $F_{\delta\mu}$ ).

При холостому ході МРС  $F_{M0}$  спрямована проти магнітного потоку  $\Phi_{\delta 0}$ . За наявності поздовжньої розмагнічувальної МРС якоря вона діє у тому ж напрямі, що й  $F_{M0}$ , викликаючи зменшення магнітного потоку  $\Phi_M$  та  $\Phi_{\delta}$ . Таким чином при поздовжній МРС якоря, спрямованій проти магнітного потоку постійного магніту, маємо:

$$F_M = F_{M0} + F_{dm}$$

(обидві величини  $F_{M0}$  і  $F_{dm}$  є від'ємні). Відтак, при появі і зростанні розмагнічувальної поздовжньої МРС якоря магнітна характеристика зовнішнього магнітного кола на графіку переміщується вліво паралельно самій собі, і точка її перетину з робочою діаграмою магніту при кожному даному значенні  $F_{dm}$  визначає відповідне йому значення  $\Phi_{\delta}$ .

Задаючи ряд значень  $F_{dm}$  і визначивши за допомогою діаграми відповідні їм значення  $\Phi_{\delta}$ , розраховуємо ЕРС і поздовжню складову струму якоря за формулами:

$$E_f = 4,44w_1f\Phi_{\delta}k_{об}, \quad I_d = \frac{F_{dm}\pi p}{m\sqrt{2}w_1k_{об}}$$

За отриманими даними побудуємо графік залежності  $E_f = f(I_d)$  і за його допомогою знаходимо величини  $E_{f0}$  та  $I'_d$ , які будуть використані при подальших розрахунках (рис. 8).

## 10. Зовнішні характеристики генератора

Зовнішні характеристики генератора є сімейство залежностей лінійної напруги на затискачах генератора від лінійного струму навантаження:

$$U_L = f(I_L) \text{ при } \Omega = \Omega_H, \varphi = \text{const.}$$

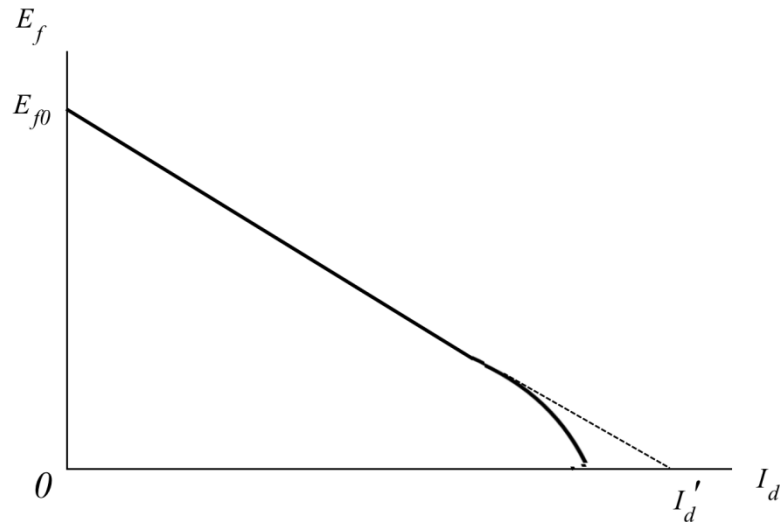


Рис. 8 Залежність ЕРС збудження від поздовжньої складової струму якоря

У курсовому проекті необхідно розрахувати і побудувати графіки зовнішніх характеристик для чисто активного і активно-індуктивного навантаження, яке відповідає значенням  $\cos \varphi = 1; 0,8; 0,6$ . Для розрахунку зовнішніх характеристик використовуються отримана вище залежність  $E_f = f(I_d)$  та рівняння, що випливають з векторної діаграми генератора (рис. 9):

$$U_d = I_d R_{HB} - I_q X_{HB}$$

$$U_q = I_d X_{HB} + I_q R_{HB}$$

та

$$I_q (R_{HB} + R) + I_d (X_d + X_{HB}) = E_f$$

$$-I_q (X_{HB} + X_q) + I_d (R_{HB} + R) = 0,$$



де  $R_{HB}$  та  $X_{HB}$  – активний та реактивний опори фази споживача при з'єднанні його за тією ж схемою, що й фази якоря генератора; для струму, напруги та ЕРС застосовано фазні величини. Як правило для якоря генератора використовується з'єднання зіркою.

Вирішуючи систему двох останніх рівнянь відносно складових струму якоря  $I_d$  та  $I_q$ , знаходячи ЕРС збудження з використанням залежності  $E_f = f(I_d)$ , а також розраховуючи складові напруги якоря за допомогою двох перших рівнянь, знаходимо значення  $U_d$  та  $I_d$ , необхідні для побудови сімейства зовнішніх характеристик. Кожна з характеристик відповідає заданому значенню коефіцієнта навантаження  $\cos \varphi = R_{HB}/Z_{HB}$ , де  $Z_{HB} = \sqrt{R_{HB}^2 + X_{HB}^2}$  – повний опір фази споживача. Характеристики необхідно побудувати для діапазону значень  $I_d = (0 \dots 1,6)I_{лн}$ .

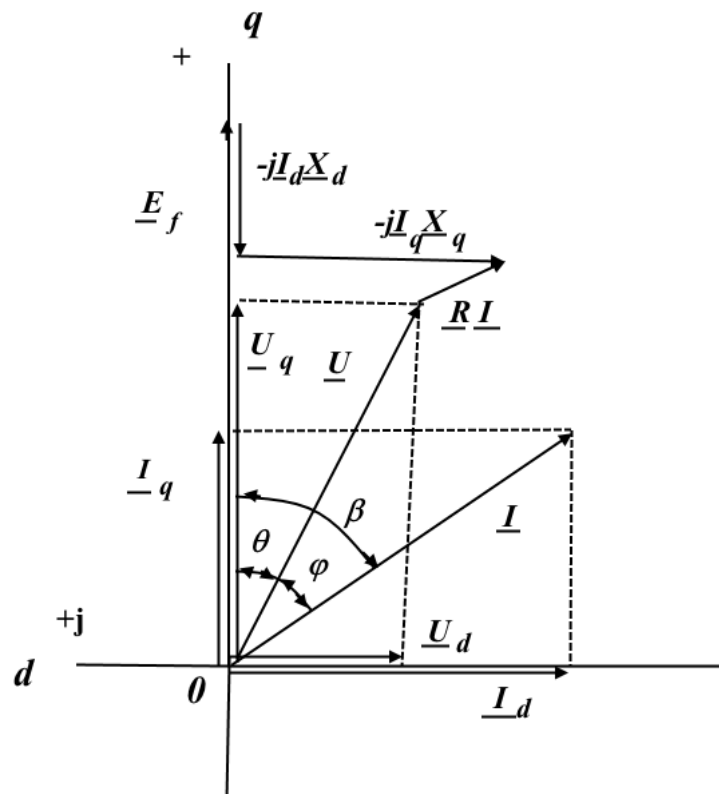


Рис. 9 Векторна діаграма синхронного генератора

Приймаючи з'єднання обмотки якоря генератора зіркою, обчислення  $U_d$  та  $I_d$  виконуємо за наведеними нижче виразами у наступній послідовності:

1. Знаходимо найменші необхідні для розрахунків зовнішньої характеристики значення фазного повного, активного та реактивного опору навантаження генератора:

$$Z_{HBmin} = \frac{U_{ЛН}}{1,6\sqrt{3}I_{ЛН}}, R_{HBmin} = Z_{HBmin} \cos \varphi, X_{HBmin} = \sqrt{Z_{HBmin}^2 - R_{HBmin}^2}.$$

2. Максимальні значення  $Z_{HB}, R_{HB}, X_{HB}$  дорівнюють безкінечності, що відповідає значенню струму якоря  $I = 0$  (режим холостого ходу).

3. Для кожного значення  $\cos \varphi$  результати розрахунків рекомендується звести до окремої таблиці:

$$\cos \varphi =$$

$R_{HB},$ Ом	$X_{HB},$ Ом	$A,$ Ом	$B,$ В	$C,$ Ом	$D,$ Ом	$I_d,$ А	$E_f,$ В	$I_q,$ А	$U_d,$ В	$U_q,$ В	$U_{л},$ В	$I_{л},$ А
$\infty$	$\infty$			$\infty$	$\infty$	0	$E_{f0}$	0	0	$E_{f0}$	$\sqrt{3}E_{f0}$	0
...												
...												
...												
...												
...												
...												
$R_{HBmin}$												

4. Для кожного рядка таблиці величини розраховуються за наведеними нижче виразами у наступній послідовності:

$$A = -\frac{E_{f0}}{I'_d}, \quad B = E_{f0}$$

(параметри А і В не залежать від струму навантаження, тому їх значення в усіх рядках таблиці одні й ті ж),

$$X_{HB} = R_{HB} \operatorname{tg} \varphi$$

$$C = \frac{(R_{HB}+R)^2}{X_{HB}+X_q} + X_{HB} + X_d,$$

$$D = R_{HB} + R + \frac{(X_{HB}+X_d)(X_{HB}+X_q)}{R_{HB}+R},$$

$$I_d = \frac{B}{C-A},$$

$$E_f = AI_d + B,$$

$$I_q = \frac{E_f}{D},$$

$$U_d = I_d R_{HB} - I_q X_{HB},$$

$$U_q = I_d X_{HB} + I_q R_{HB},$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2},$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

Враховуючи, що у режимі холостого ходу  $I = 0$ ,  $U = E_{f0}$ , у перший рядок даних при будь-якому значенні  $\cos \varphi$  заносяться значення величин як показано у наведеній формі таблиці.

Графіки зовнішніх характеристик для заданих значень  $\cos \varphi$  необхідно побудувати в одній системі координатних осей.

## 11. Основні вихідні та розрахункові параметри

У таблиці на листі креслень слід навести значення наступних параметрів:

- Значення параметрів *за вихідними даними* проекту:
  - Число фаз генератора  $m$ ;
  - Задана номінальна потужність  $P_H$ , кВт;
  - Коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні  $\cos \varphi_H$ ;
  - Номінальна частота  $f_H$ , Гц;
  - Номінальна частота обертання ротора  $n_H$ , об/хв.;
  - Клас нагрівостійкості ізоляції.
- *Розрахункові значення параметрів* генератора:
  - Зовнішній діаметр сердечника якоря  $D$ , мм;
  - Внутрішній діаметр сердечника якоря  $D_a$ , мм;
  - Осьова довжина магнітопроводу  $l_\delta$ , мм;
  - Висота паза якоря  $h_p$ , мм;
  - Повітряний зазор  $\delta$ , мм;
  - Зовнішній діаметр втулки ротора  $D_{j1}$ , мм;
  - Внутрішній діаметр втулки ротора  $D_{j2}$ , мм;
  - Тип обмотки якоря;
  - Лінійне струмове навантаження якоря  $A, A/m$ ;

- Число пазів якоря  $z$ ;
- Число пазів на полюс і фазу  $q$ ;
- Коефіцієнт скорочення  $k_{ск}$ ;
- Коефіцієнт розподілення  $k_p$ ;
- Обмотковий коефіцієнт  $k_{об}$ ;
- Число паралельних віток обмотки якоря  $a$ ;
- Число витків фази якоря  $w_1$ ;
- Площа перерізу ефективного провідника  $q_{еф}$ , мм<sup>2</sup>;
- Число ефективних провідників обмотки якоря у пази  $u_п$ ;
- Кількість елементарних провідників  $n_{ел}$ ;
- Площа перерізу елементарного провідника  $q_{ел}$ , мм<sup>2</sup>;
- Активний опір фази якоря  $R$ , Ом;
- Індуктивний опір розсіювання фази якоря  $X_\sigma$ , Ом;
- Повний індуктивний опір фази якоря по поздовжній осі  $X_d$ , Ом;
- Повний індуктивний опір фази якоря по поперечній осі  $X_q$ , Ом;
- Магнітна індукція у повітряному зазорі при холостому ході  $B_{\delta 0}$  та при номінальному струмі якоря  $B_{\delta н}$ , Т;
- Магнітний потік у повітряному зазорі при холостому ході  $\Phi_{\delta 0}$  та при номінальному струмі якоря  $\Phi_{\delta н}$ , Вб;
- Лінійна напруга генератора при холостому ході  $U_{ол}$  та при номінальному струмі якоря  $U_{нл}$ , В.

**Примітка:** значення  $B_{\delta н}$ ,  $\Phi_{\delta н}$ ,  $U_{нл}$  повинні бути вказані для трьох значень  $\cos \varphi$ , для яких виконувався розрахунок зовнішніх характеристик.

## Література

1. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика»/Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1990. – 304 с.: ил.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.: ил.
3. Проектирование электрических машин: Учебник для студентов электротехнических и энергетических специальностей/И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 2005.–767 с.: ил.

4. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов /И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980.–496 с.: ил.

5. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах/ А. И. Яковлев, М. А. Затучная, В. Н. Меркушев, В. Н. Пашков. — Учеб. по-сobie по курсовому проектированию. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. — 125 с.

6. Проектування електричних машин: Навч. посібник/Д.В. Ципленков, Ю.В. Куваєв, О.Б. Іванов, І.А. Кирилов; За ред. Ф.П. Шкрабця. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 325 с. іл.