

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

методичні рекомендації
до виконання курсового проекту для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв

2025

Рекомендовано до друку методичною радою Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 18.09.2025, протокол № 1.

Укладач:

Ростислав Ставинський – канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Олексій Садовий – канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Володимир Рябенський – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою програмованої, електроніки, електротехніки та телекомунікації, Миколаївський національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. Вибір електромагнітних навантажень і визначення головних розмірів двигуна.....	7
2. Розміри активної частини двигуна.....	11
2.1. Пази статора.....	16
2.2. Пази ротора.....	20
3. Обмотка статора.....	24
4. Короткозамкнена обмотка ротора.....	35
4.1. Овальні напівзакриті й закриті пази.....	36
4.2. Пляшкові закриті пази.....	41
5. Розрахунок магнітного ланцюга.....	44
6. Втрати й ККД асинхронного двигуна.....	51
7. Схема заміщення асинхронного двигуна.....	54
8. Побудова кругової діаграми.....	56
9. Робочі характеристики.....	60
10. Пускові параметри.....	64
11. Аналітичний метод розрахунку робочих характеристик.....	68
12. Тепловий розрахунок двигуна.....	71
13. Список літератури.....	77

ВСТУП

Сучасний рівень розвитку електроенергетики та електромеханіки неможливо уявити без широкого застосування електричних машин різних типів і потужностей. Електричні машини є основою більшості промислових установок, транспортних систем, побутових приладів, автоматизованих і роботизованих комплексів. Вони забезпечують перетворення електричної енергії в механічну та навпаки, що робить їх ключовою ланкою у виробничих і технологічних процесах.

Вивчення дисципліни «Електричні машини» має на меті формування у здобувачів вищої освіти фундаментальних знань про принципи роботи, конструкцію, характеристики та методи розрахунку електричних машин змінного і постійного струму. Особлива увага приділяється практичним аспектам проєктування, експлуатації та підвищення енергоефективності електромеханічних систем.

Курсовий проєкт з дисципліни є важливою складовою навчального процесу, оскільки дозволяє студентам застосувати теоретичні знання на практиці, набути навичок технічного розрахунку, конструкторського аналізу й оформлення технічної документації. У процесі виконання проєкту студенти набувають досвіду вибору параметрів електричних машин, розрахунку їхніх основних розмірів, обмоток, магнітних і теплових характеристик.

Метою методичних рекомендацій є надання допомоги здобувачам освіти у правильному виконанні курсового проєкту, дотриманні послідовності розрахунків, використанні сучасних методів і нормативних даних. У документі наведено основні формули, таблиці та графічні залежності, необхідні для виконання проєктних розрахунків, а також вимоги до структури, змісту й оформлення пояснювальної записки.

Розроблені методичні рекомендації спрямовані на підвищення якості підготовки майбутніх фахівців з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, формування у них інженерного мислення, уміння аналізувати технічні процеси та приймати обґрунтовані проєктні рішення.

1. ВИБІР ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА

Головними розмірами асинхронного двигуна є внутрішній діаметр сердечника статора D_1 і його розрахункова довжина l_i , тобто його довжина без обліку радіальних вентиляційних каналів:

$$l_i = l_1 - n_k b_k, \quad (1)$$

де l_i – конструктивна довжина сердечника статора; b_k і n_k – ширина й число радіальних вентиляційних каналів.

Зовнішні $D_{1\text{нар}}$ й внутрішній D_1 діаметри статора можна визначити по табл. 2. Зазначені в таблиці діаметри відповідають найбільш високим техніко-економічним показникам двигунів серії 4А.

Розрахункову потужність двигуна, кВт·А, визначають по заданій номінальній потужності:

$$P_i = \frac{P_{2\text{ном}} k_E}{\eta'_n \cos \phi'_n},$$

де $k_E = E_1 / U_1 = 0,90 - 0,98$, більше значення k_E відповідає меншому числу полюсів $2p$; $\eta'_n, \cos \phi'_n$ – попередні значення ККД і коефіцієнта потужності в номінальному режимі (звичайно задаються).

Попередні значення максимальної індукції в повітряному зазорі B'_δ й лінійного навантаження A'_l можна визначити по кривих рис. 1.

Таблиця 1

h, мм	Номінальна потужність, кВт, двигунів при 2р					
	2	4	6	8	10	12
	Ступінь захисту IP44					
50	0,09	0,06	—	—	—	—
	0,12	0,09	—	—	—	—
56	0,18	0,12	—	—	—	—
	0,25	0,18	—	—	—	—
63	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	0,75	0,55	0,37	0,25	—	—
	1,10	0,75	0,55	—	—	—
80	1,50	1,10	0,75	0,37	—	—
	2,20	1,50	1,10	0,55	—	—
90	3,00	2,20	1,50	0,75	—	—
				1,10	—	—
100	4,00	3,00	—	—	—	—
	5,50	4,00	2,20	1,50	—	—
112	7,50	5,50	3,00	2,20	—	—
			4,00	3,00	—	—
132	11,00	7,50	5,50	4,00	—	—
		11,00	7,50	5,50	—	—
160	15,00	15,00	11,00	7,50	—	—
	18,50	18,50	15,00	11,00	—	—
180	22,00	22,00	18,50	15,00	—	—
	30,00	30,00			—	—
200	37,00	37,00	22,00	18,50	—	—
	45,00	45,00	30,00	22,00	—	—
225	55,00	55,00	37,00	30,00	—	—
250	75,00	75,00	45,00	37,00	—	—
	90,00	90,00	55,00	45,00	—	—
280	110	110	75	55	—	—
	132	132	90	75	—	—
315	160	160	110	90	55	45
	200	200	132	110	75	55
355	250	250	160	132	90	75
	315	315	200	160	110	90
	Ступінь захисту IP23					
160	22	18,5	11	7,5	—	—
	30	22	15	11	—	—
180	37	30	18,5	15	—	—
	45	37	22	18,5	—	—
200	55	45	30	22	—	—
	75	55	37	30	—	—
225	90	75	45	37	—	—
	110	90	55	45	—	—
250	132	110	75	55	—	—
	160	132	90	75	—	—
280	200	160	110	90	—	—
315	250	200	132	110	75	55
		250	160	132	90	75
355	315	315	200	160	110	90
	400	400	250	200	132	110

Таблиця 2

h , мм	$D_{\text{нар}}$, мм	$2p$	D_1 , мм	h , мм	$D_{\text{нар}}$, мм	$2p$	D_1 , мм
50	81	2 4	41 46	200	349	2 4 6,8	194 238 250
56	89	2 4	48 55	225	392	2 4 6,8	208 254 284
63	100	2 4 6	54 61 65	250	437	2 4 6,8	232 290 317
71	116	2 4 6,8	65 70 76	280	520	2 4 6 8,10	275 335 370 385,400
80	131	2 4 6,8	74 84 88	315*	520	2 4 6 8 10	275 335 370 385 400
90	149	2 4 6,8	84 95 100	315*	590	2 4 6 8 10,12	310 380 425 440 450
100	168	2 4 6,8	95 105 113	355*	590	2 4 6 8 10,12	310 380 425 440 450
112	191	2 4 6,8	110 126 132	355**	600	2 4 6 8 10,12	345 435 470 490 500
h , мм	$D_{\text{нар}}$, мм	$2p$	D_1 , мм				
132	225	2 4 6,8	130 145 158				
160	272	2 4 6,8	155 185 197				
180	313	2 4 6,8	171 211 220				

*) Виконання IP44.

**) Виконання IP23.

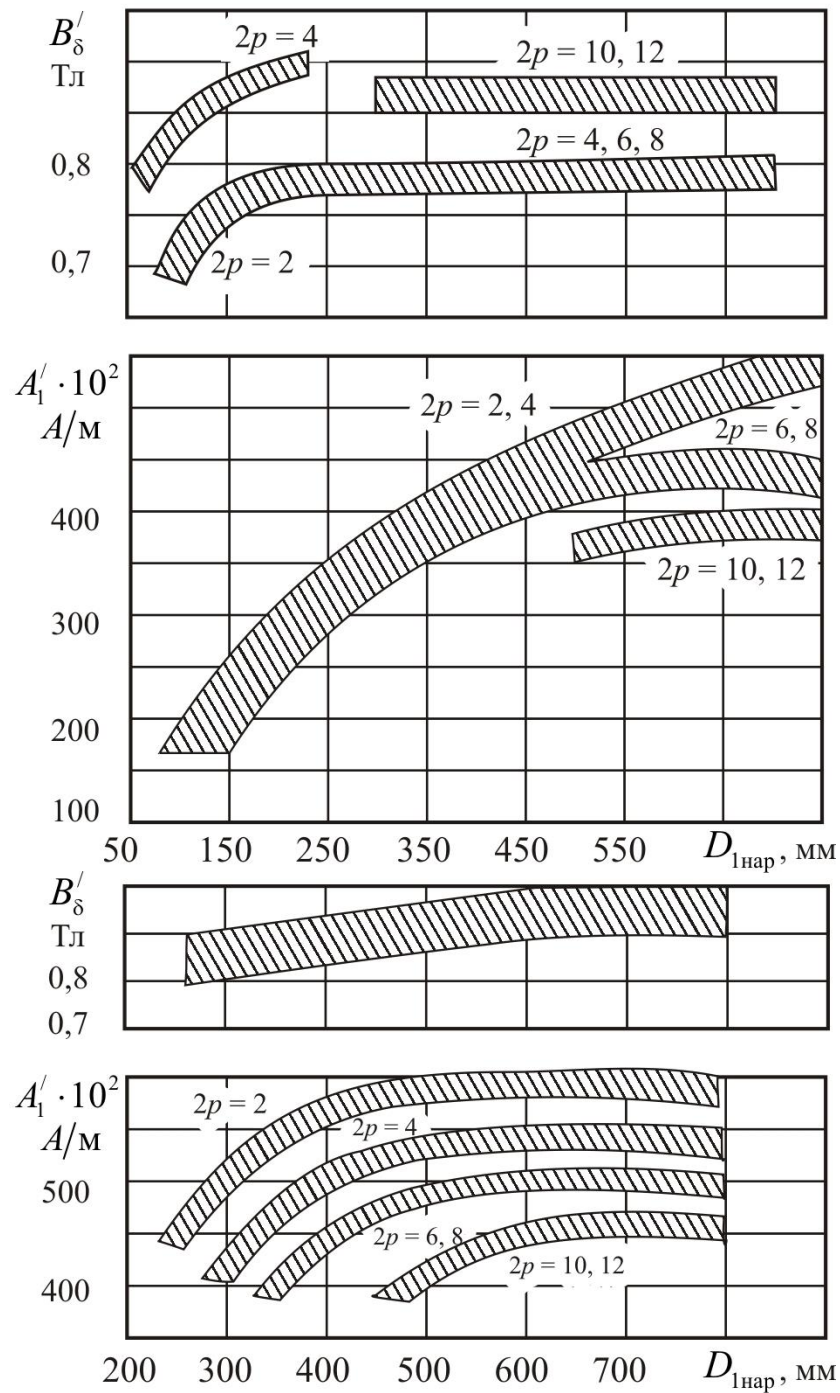


Рис. 1

Попередні значення обмотувального коефіцієнта приймають: для одношарових обмоток $k'_{об1} = 0,96$; для двошарових обмоток $k'_{об1} = 0,8$ при $p = 2$ і $k'_{об1} = 0,90 \div 0,96$ при $p = 4$.

При синусоїдальному розподілі індукції в повітряному зазорі двигуна коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_i = 2 / \pi = 0,64$, а коефіцієнт форми поля $k_b = \pi / 2\sqrt{2} = 1,11$. Однак у реальних умовах роботи двигуна через насичення зубців статора й ротора крива розподілу індукції в зазорі стає більш плоскою. З метою спрощення розрахунку приймають $\alpha'_i = 0,64$ і $k_b = 1,11$, а викривлення кривої розподілу індукції в зазорі враховують при розрахунку магнітних напруг зубців і спинки статора й ротора, використовуючи спеціальні таблиці намагнічування для спинки й зубців двигунів.

Розрахункова довжина статора двигуна, мм,

$$l_i = \frac{8,66 \cdot 10^{12} P_i}{k_{об1} n_1 D_1^2 B'_\delta A'_1}. \quad (2)$$

Отримане значення l_i варто округлити до цілого й визначити коефіцієнт довжини

$$\lambda = \frac{l_i}{D_1},$$

величина якого повинна бути в межах $0,5 \div 0,8$.

2. РОЗМІРИ АКТИВНОЇ ЧАСТИНИ ДВИГУНА

Сердечники статора й ротора набирають зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Рекомендації із застосування холоднокатаних ізотропних сталей у двигунах наведені в табл. 3.

Таблиця 3

h, мм	Марка сталі	Спосіб ізолювання аркушів		
		статора	ротора	
			короткозамкненого	фазного
50.....250	2013	Оксидування	Оксидування	Лакирування
280.....355	2312	Лакирування		

Від способу ізолювання листів залежить коефіцієнт заповнення сердечників сталлю k_c : при оксидуванні $k_c = 0,97$, при лакуванні $k_c = 0,95$.

Повітряний зазор δ між статором і ротором істотно впливає на техніко-економічні показники двигуна. При проектуванні асинхронних двигунів повітряний зазор доцільно приймати за даними двигунів єдиної серії 4А, наведеним на рис. 2.

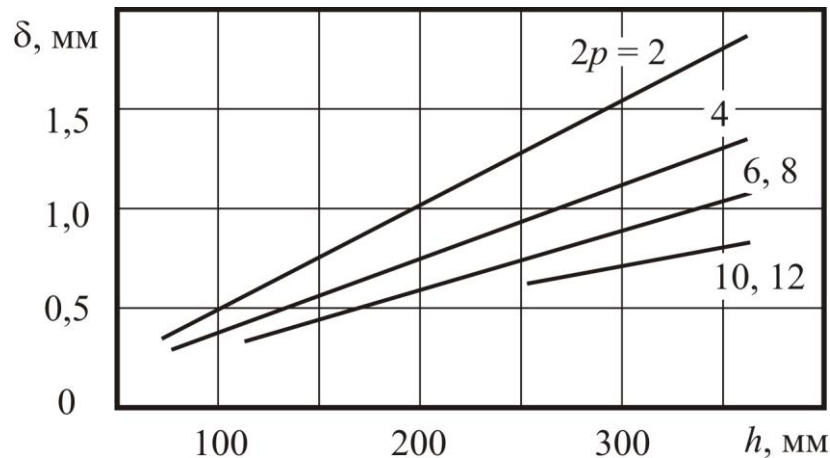


Рис. 2

Основні розміри активної частини асинхронного двигуна показані на рис. 3.

Зовнішній діаметр сердечника ротора, мм,

$$D_2 = D_1 - 2\delta.$$

Внутрішній діаметр сердечника ротора $D_{2\text{вн}}$, мм,

$$D_{2\text{вн}} \approx (0,3 - 0,35) D_2.$$

Значення $D_{2\text{вн}}$ може бути уточнене при розрахунку вала на твердість.

Для можливості охолодження асинхронні двигуни виконують із самовентиляцією. У таких машин вентилятор розташований на валу або передбачені лопатки на обертових частинах машини (обмоткотримачах, короткозамкнених кільцях). Самовентиляція може бути зовнішньою й внутрішньою. При зовнішній обдувається зовнішня ребриста поверхня машини.

Машину в цьому випадку виконують закритою (виконання IP44), тобто в її корпусі не роблять яких-небудь спеціальних отворів для сполучення внутрішньої порожнини машини із зовнішнім середовищем. При внутрішній самовентиляції в корпусі й підшипникових щитах машини є спеціальні отвори (виконання IP22 і IP23), через які повітря проникає усередину машини, прохолоджує її, а потім викидається назовні.

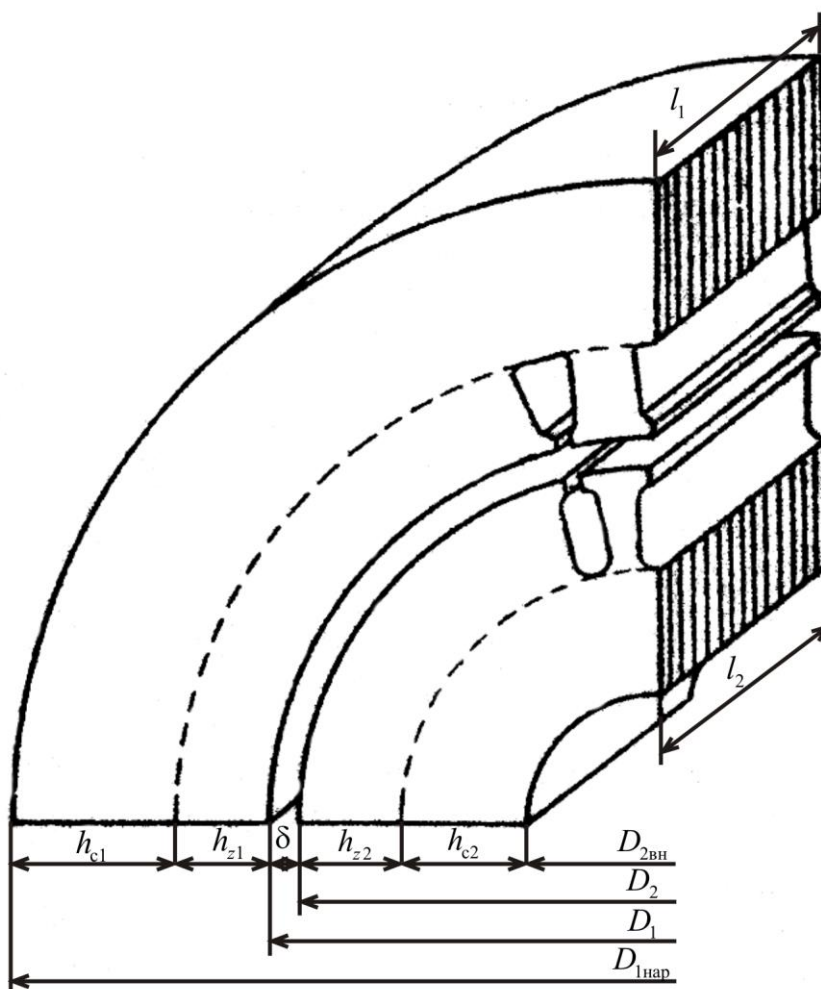


Рис. 3

Залежно від напрямку руху охолодного повітря усередині машини розрізняють вентиляцію радіальну й аксіальну. При радіальній вентиляції переважає рух повітря перпендикулярно осі обертання машини, а при аксіальній – уздовж осі. Для підвищення ефективності охолодження в машинах передбачають вентиляційні канали. При радіальній вентиляції сердечники

статора й ротора ділять на кілька пакетів. При аксіальній вентиляції в сердечнику ротора виконують аксіальні канали.

Конструктивна довжина сердечника статора при відсутності радіальних вентиляційних каналів дорівнює його розрахунковій довжині, тобто $l_1 = l_i$, при наявності їх

$$l_1 = l_i + n_k b_k.$$

Число радіальних каналів n_k при їхній ширині $b_k = 10$ мм приймають таким, щоб довжина середніх пакетів статора була 80–100 мм, а крайніх трохи більше. Число й ширину радіальних вентиляційних каналів у сердечнику ротора приймають таким же, що й у статорі. Довжину сердечника ротора l_2 при $h < 250$ мм приймають рівній довжині сердечника статора, тобто $l_1 = l_2$; при $h > 250$ мм $l_2 = l_1 + 5$ мм.

У двигунах з висотою осі обертання $h \geq 180$ мм у сердечнику ротора передбачають один ряд аксіальних вентиляційних каналів для поліпшення охолодження й зменшення махового моменту ротора. При виборі кількості $n_{к.а.}$ й діаметра $d_{к.а.}$ цих каналів можна керуватися співвідношеннями, наведеними в табл. 4.

Вибір співвідношення числа пазів статора й ротора і їхні розміри в значній мірі визначають властивості проектованої машини й трудомісткість її виготовлення. Зі збільшенням числа пазів у сердечнику форма кривої МРС у зазорі наближається до синусоїдальної, що сприяє ослабленню вищих гармонік ЕРС. Це веде до поліпшення енергетичних показників машини, однак надмірно велика кількість пазів погіршує їхнє заповнення міддю, ускладнює виготовлення штампів, зменшує перетин зубців і їхню міцність.

Вищі гармоніки створюють додаткові синхронні й асинхронні моменти, які погіршують робочі й пускові характеристики двигуна. Величина цих моментів залежить від співвідношення числа пазів статора z_1 і ротора z_2 . Досвід проектування й експлуатації двигунів серії 4А дозволив установити найбільш

сприятливі співвідношення z_1 і z_2 , які й наведені в табл. 5.

Таблиця 4

h , мм	$2p$	$n_{\text{к.а.}}$	$\alpha_{\text{к.а.}}$, мм	$n_{\text{к.а.}}$	$\alpha_{\text{к.а.}}$, мм
		при способі захисту			
		IP44		IP23	
180	2	–	–	–	–
	4,6,8	10	18	10	18
200	2	10	12	10	13
	4	12	16	12	16
	6,8	12	22	12	28
225	2	12	12	12	12
	4		20		20
	6,8		25		25
250	2	12	15	12	15
	4	10	25	10	25
	6,8	10	30	10	30
280	2	12	20	–	–
315	4		32	12	26
	6,8,10		32	12	40
355	2	12	20	–	–
	4,6,8,10,12		40	12	40

Таблиця 5

Висота осі обертання, мм	z_1/z_2 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50	12/9	12/15	–	–	–	–
56	24/18	24/18	–	–	–	–
63	24/18	24/18	36/28	–	–	–
71	24/20	35/28	36/28	36/28	–	–
80 – 100	24/20	36/28	36/28	36/28	–	–
112	24/22	36/34	54/51	48/44	–	–
132	24/19	36/34	54/51	48/44	–	–
160	36/28	48/38	54/50	48/44	–	–
180 – 200	36/28	48/38	72/58	72/58	–	–
225	36/28	48/38	72/56	72/56	–	–
250	48/40	60/50	72/56	72/56	90/76	–
280 – 355	48/38	60/50	72/82	72/86	90/106	90/106

З метою поліпшення пускових характеристик і зниження шуму в асинхронних двигунах з $h \leq 160$ мм пази ротора скошують, як правило, на один

зубцевий розподіл статора. Скіс $b_{ск}$ означає максимальне зміщення осі паза щодо утворюючої циліндричної поверхні ротора, проведеної з одного кінця паза в інший. Однак скіс пазів збільшує трудомісткість виготовлення двигуна, тому у двигунах з $h > 160$ мм скосу пазів не роблять. Крім того, він не дає істотного поліпшення пускових характеристик.

2.1. Пази статора

У машинах змінного струму використовують наступні форми пазів сердечника статора: трапецеїдальні напівзакриті й прямокутні напіввідчинені або відкриті (рис.4).

При трапецеїдальних пазах зубці статора мають паралельні стінки і їхній перетин однаковий по всій висоті паза. Вони мають мале розкриття, що сприяє зменшенню пульсації магнітної індукції в зазорі, зменшенню магнітної напруги в повітряному зазорі й додаткових втрат. Однак при таких пазах коефіцієнт заповнення міддю невеликий. Напівзакриті пази використовують при виспінній обмотці статора, виконаної із проведення круглого перетину.

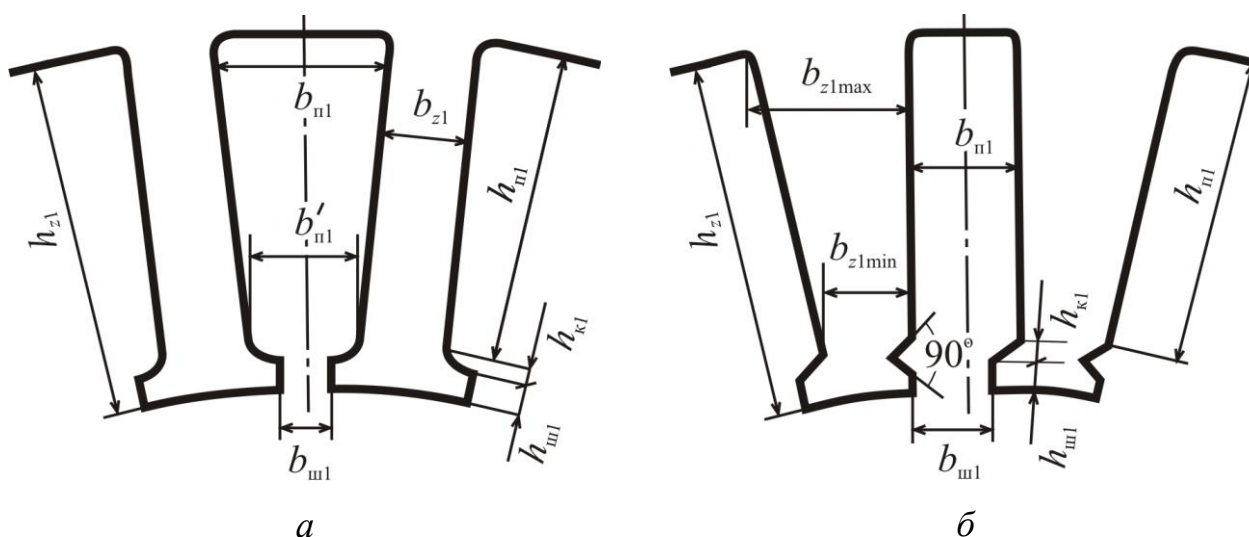


Рис. 4

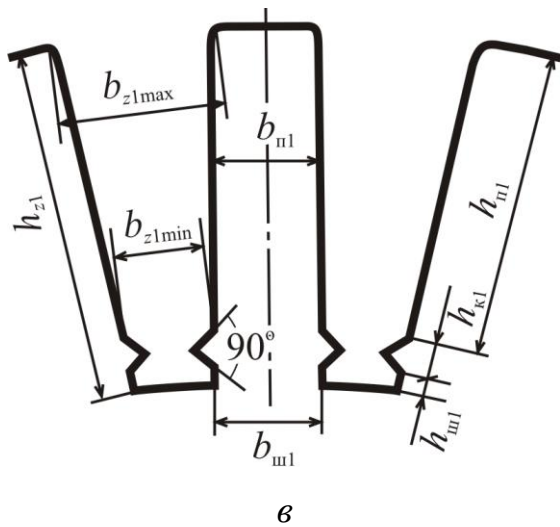


Рис. 4

При прямокутних пазах зубці статора мають трапецеїдальну форму зі зменшеним перетином з боку повітряного зазору. У цьому перетині магнітна індукція максимальна. Велике розкриття напіввідчинених, а тим більше відкритих, пазів викликає посилення пульсацій магнітної індукції в зазорі й збільшення додаткових втрат. Але при таких пазах коефіцієнт заповнення міддю вище.

У табл.6 дані рекомендації з вибору форми паза статора й типу обмотки.

Таблица 6

h , мм	$2p$	Форма паза статора	Тип обмотки статора	$B_{z1 \max}$	B_{c1}
				Тл	
50–132	2,4	Трапецеїдальні	Одношарова всипна	1,75-1,95	1,50-1,65
	6			1,75-1,95	1,45-1,60
	8			1,70-1,90	1,20-1,35
160	2		Двошарова всипна	1,75-2,00	1,45-1,70
	4			1,75-2,00	1,45-1,70
	6		Одношарова всипна	1,70-1,85	1,35-1,50
	8			1,70-1,85	1,10-1,20
180–250	2		Двошарова всипна	1,70-1,90	1,45-1,65
	4,6		Одно-, двошарова всипна	1,70-1,90	1,45-1,65
	8		Двошарова всипна	1,70-1,85	1,10-1,20
	8		Двошарова всипна	1,70-1,85	1,10-1,20
280–355	2,4	Прямокутні напіввідчинені	Двошарова із твердих напівкатушок	1,70–1,90	1,40–1,60
	6,8	Прямокутні напіввідчинені			
	10	Трапецеїдальні напівзакриті	Двошарова концентрична всипна	1,60-1,80	1,30-1,45
	12				

Примітка. Значення індукції наведені для двигунів виконання по способу захисту IP44, рекомендовані значення для двигунів виконання IP23 варто збільшити на 8 %.

При визначенні розмірів паза розрізняють його розміри у світлі й у штампі. Розміри у світлі трохи менше розмірів у штампі через неточність штампування й деякого зменшення паза при зборці листів у сердечник, що враховується припусками на штампування по висоті $h_{\text{пр}}$ і ширині $b_{\text{пр}}$ паза. Ці припуски приймають 0,1 мм при $h = 50 \div 132$ мм, 0,2 мм – при $h = 160 \div 250$ мм і 0,3 мм – при $h = 280 \div 355$ мм.

Трапецеїдальні напівзакриті пази (рис. 4, а). Розміри цих пазів вибирають такими, щоб зубець мав паралельні стінки. Ширину зубця, мм, визначають за припустимим значенням індукції в зубці статора $B_{z_1 \text{ max}}$ (див. таблицю 6):

$$b_{z_1} = \frac{B'_\delta t_1}{k_{c_1} B_{z_1 \text{ max}}},$$

де $t_1 = \pi D_1 / z_1$ – зубцове ділення статора, тобто відстань між осями двох сусідніх зубців, обмірювана по внутрішньому діаметрі статора, мм.

Висота зубця, мм,

$$h_{z_1} = 0,5(D_{1\text{н}} - D_1) - h_{c_1},$$

де h_{c_1} – висота спинки статора, мм (див. рис. 3). Значення h_{c_1} визначається припустимими величинами індукції в спинці статора B_{c_1} (див. табл. 6):

$$h_{c_1} = \frac{0,5\alpha'_i \tau B'_\delta}{k_{c_1} B_{c_1}},$$

де $\tau = \pi D_1 / 2p$ – полюсне ділення; $\alpha'_i = 0,64$ – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

Ширина паза в штампі, мм:

- найменша

$$b_{\text{пл}} = t_1'' - b_{z_1},$$

де $t_1'' = \pi(D_1 + 0,2h_{z_1}) / z_1$;

- найбільша

$$b_{\text{пл}} = t_1' - b_{z_1},$$

де $t'_1 = \pi(D_1 + 2h_{z_1}) / z_1$.

Ширина шліца паза статора $b_{ш1}$ повинна бути такою, щоб при прийнятій товщині пазової ізоляції через шліци можна було укласти в пази котушки (секції) по одному дроту. Звичайно діаметр ізольованого дроту $d_{из} \leq 1,76$ мм, а $b_{ш1} \leq 4,0$ мм.

Висота шліца $h_{ш1} = 0,8-1,2$ мм. Кут $\beta = 45^\circ$ у двигунах з $h \leq 250$ мм і $\beta = 30^\circ$ у двигунах з $h \geq 280$ мм. Тоді висота клинової частини паза h_{k1} , мм:

при $\beta = 45^\circ$ $h_{k1} = 0,5 (b'_{п1} - b_{ш1})$;

при $\beta = 30^\circ$ $h_{k1} = 0,29 (b'_{п1} - b_{ш1})$.

Площа поперечного переріза трапецеїдального паза в штампі, мм²,

$$S_{п1} = 0,5(b_{п1} + b'_{п1})h_{п1} + 0,5(b'_{п1} + b_{ш1})h_{k1} + b_{ш1}h_{ш1}, \quad (3)$$

де $h_{п1} = h_{z1} - h_{k1} - h_{ш1}$.

Прямокутні напівзакриті пази (рис. 4,б). Розміри:

– ширина зубця у вузькому місці, мм,

$$b_{z1min} = \frac{B'_{\delta 1} t_1}{k_{c1} B_{z1min}}, \quad (4)$$

де B_{z1min} – максимальне значення індукції в зубці статора, приймають по табл. 6;

– ширина напіввідчиненого паза в штампі, мм,

$$b_{п1} = t''_1 - b_{z1min}, \quad (5)$$

де

$$t''_1 = \frac{\pi(D_1 + 2h_{ш1} + 2h_{k1})}{z_1}.$$

Для напівзакритих пазів відношення $b_{п1} / t'_1 = 0,46 \div 0,56$, причому більші значення відносяться до менших діаметрів D_1 .

Висота шліца $h_{ш1} = 0,8 \div 1,2$ мм, висоту клинової частини паза приймають: при $2p = 2$, $h_{k1} = 3,5$ мм; при $2p = 4, 6, 8$, $h_{k1} = 3$ мм; ширина шліца напіввідчиненого паза $b_{ш1} \approx (0,58 - 0,60)b_{п1}$ мм.

Висота паза (зубця), мм,

$$h_{z1} = 0,5(D_{1н} - D_1) - h_{c1};$$

висота частини паза, займаного обмоткою, мм,

$$h_{п1} = h_{z1} - h_{ш1} - h_{k1}. \quad (6)$$

Розміри прямокутних відкритих пазів визначають аналогічно розмірам напіввідчинених пазів.

2.2. Пази ротора

Вибір форми пазів короткозамкненого ротора (рис.5) залежить від потужності двигуна, числа полюсів і необхідних пускових характеристик. У двигунах невеликої потужності звичайно застосовують пази овальної форми (рис. 5, а, б). З ростом потужності для двохполюсних двигунів використовують пази пляшкової форми або овальні пази зі зменшеним перетином у верхній частині (рис. 5, в, г), у яких витиснення струму в стрижнях ротора проявляється більш ефективно. Це поліпшує пускові характеристики двигуна, тобто зменшує пусковий струм і збільшує пусковий момент. Рекомендації з вибору форми пазів короткозамкненого ротора наведені у табл.7.

Ширина зубців ротора b_{z2} , мм, визначається значенням індукції в розрахунковому перетині зубця B_{z2max} (див. табл. 7):

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2}{k_{c2} B_{z2max}}, \quad (7)$$

де $t_2 = \pi D_2 / z_2$ – зубцове ділення по зовнішньому діаметрі ротора D_2 , мм; k_{c2} – коефіцієнт заповнення сердечника ротора сталлю.

Висота зубця (паза) ротора, мм

$$h_{z2} = 0,5(D_2 - D_{2вн}) - h_{c2}. \quad (8)$$

Висота спинки сердечника ротора h_{c2} , мм, визначається припустимим значенням магнітної індукції в спинці ротора B_{c2} (див. табл. 7):

$$h_{c2} = \frac{0,5\alpha'_i \tau B'_\delta}{k_{c2} B_{c2}}.$$

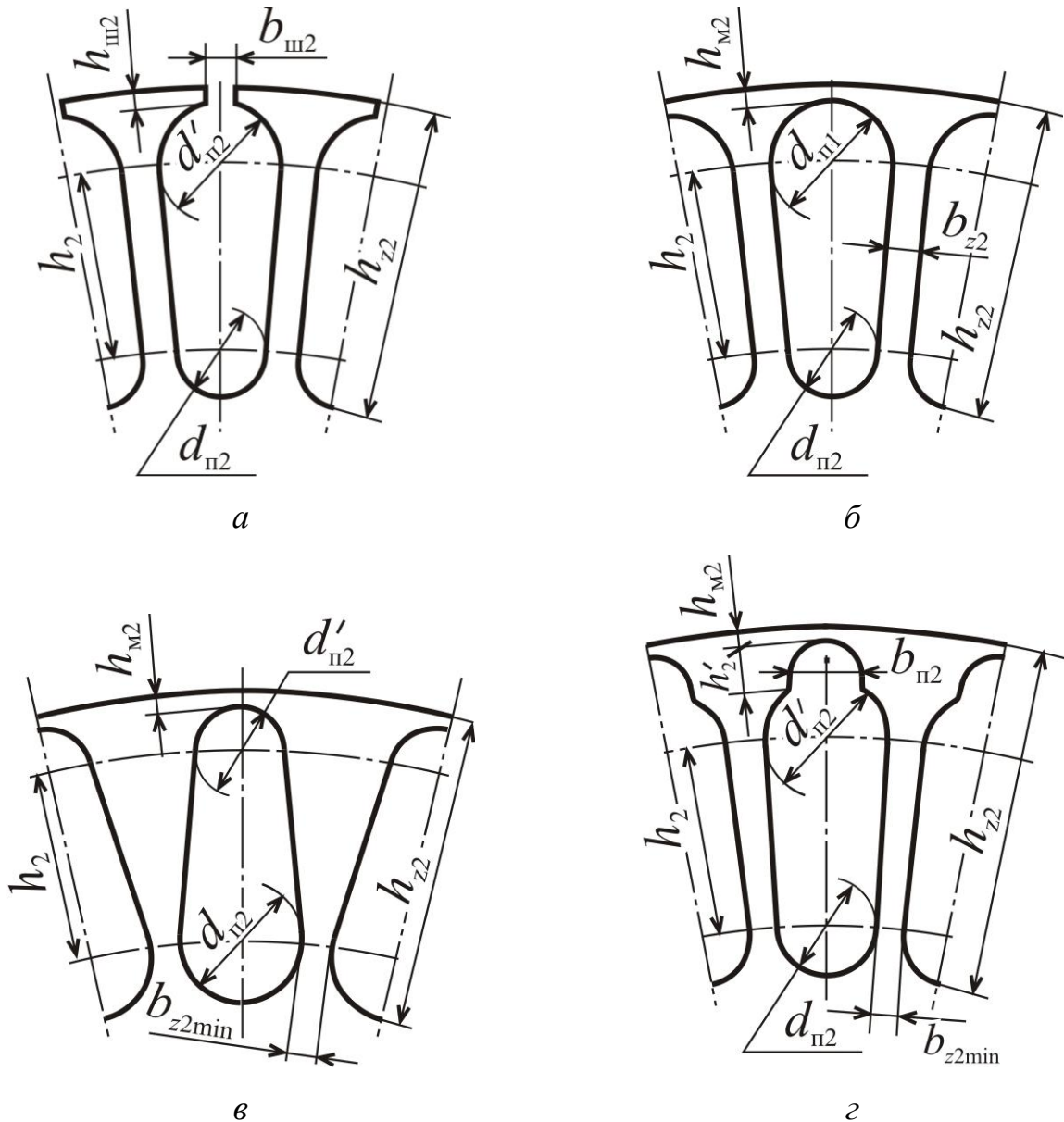


Рис.5

Розміри овальних пазів (див. рис.5,а,б) розраховують таким чином, щоб зубці ротора мали паралельні стінки. Для цього діаметри пазів, мм, визначають по формулах:

- діаметр у верхній частині паза

$$d'_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{ш2}) - z_2 b_{z2}}{z_2 + \pi}; \quad (9)$$

- діаметр у нижній частині паза

$$d_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{ш2}) - z_2 b_{z2}}{z_2 - \pi}. \quad (10)$$

Діаметр у нижній частині паза $d_{п2}$ повинен бути не менш 2 мм у двигунів із $h \leq 132$ мм і не менш 3,5 мм у двигунів із $h \geq 160$ мм.

Відстань між центрами окружностей овального паза, мм,

$$h_2 = h_{z2} - h_{ш2} - 0,5(d_{п2} + d'_{п2}). \quad (11)$$

При овальному закритому пазу в (9) і (11) замість висоти шліца $h_{ш2}$ варто підставляти висоту містка $h_{м2} = 0,5-1,0$ мм. Для овальних напівзакритих пазів (див. рис. 5,а) $h_{ш2} = 0,5-0,7$ мм, $b_{ш2} = 1,0-1,5$ мм.

Таблиця 7

h , мм	$2p$	Форма пазів ротора по рис. 5	B_{z2max}	$B_{с2}$
			Тл	
50–132	2	a	1,75-1,95	1,35-1,45
	4		1,75-1,95	1,15-1,25
	6		1,75-1,95	1,05-1,15
	8		1,70-1,90	0,75-0,85
160–225	2	a	1,75-1,95	1,35-1,45
	4	$\bar{b}$	1,55-1,80	1,20-1,35
	6	$\bar{b}$	1,65-1,90	1,05-1,15
	8	$\bar{b}$	1,65-1,90	0,75-0,85
250	2	c	1,70-1,95	1,35-1,45
	4	a	1,65-1,90	1,15-1,25
	6	a	1,65-1,90	1,05-1,15
	8	a	1,65-1,90	0,75-0,85
280–355	2	c	1,60-1,85	1,35-1,45
	4	$\bar{b}$	1,80-2,00	1,15-1,25
	6	$\bar{b}$	1,65-1,90	1,05-1,15
	8	$\bar{b}$	1,65-1,90	0,75-0,85
	10,12	$\bar{b}$	1,65-1,90	0,75-0,85

Примітка. Значення індукції наведені для двигунів виконання IP44, рекомендовані значення для двигунів виконання IP23 варто збільшити на 8 %.

При овальному закритому пазу, виконаному по рис. 5, в, більший діаметр $d_{п2}$ визначається по (10), але замість b_{z2} потрібно підставити ширину зубця в розрахунковому перетині b_{z2min} з (7). Менший діаметр цього паза

$$d'_{п2} \approx (0,6 - 0,8) d_{п2}.$$

Площа поперечного переріза овального паза в штампі, мм²,

$$S_{п2} = 0,25\pi(d_{п2}^2 + d_{п2}'^2) + 0,5h_2(d_{п2} + d_{п2}').$$

Для пляшкового паза (рис. 5,г) розміри нижньої частини вибирають із умови одержання зубця з паралельними стінками. Ширину b_{z2min} визначають по (7) з обліком прийнятої в табл. 7 магнітної індукції B_{z2max} . Більший діаметр нижньої частини паза, мм,

$$d_{п2} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{м2} - 2h_2') - z_2 b_{z2min}}{z_2 + \pi},$$

де $h_{м2} = (0,2 - 0,5)$ мм; $h_2' = 15$ мм.

Висоту зубця h_{z2} визначають по (6) з урахуванням прийнятої індукції в спинці сердечника ротора B_{c2} .

Менший діаметр нижньої частини паза, мм,

$$d'_{п2} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{z2}) - z_2 b_{z2min}}{z_2 - \pi}.$$

Значення $d'_{п2}$ повинне бути не менш 4 мм. Відстань між центрами діаметрів нижньої частини пляшкового паза, мм,

$$h_2 = h_{z2} - h_{м2} - h_2' - 0,5(d_{п2} + d'_{п2}).$$

Площа поперечного переріза нижньої частини паза в штампі, мм²,

$$S_{п2н} = 0,125\pi(d_{п2}^2 + d_{п2}'^2) + 0,5h_2(d_{п2} + d_{п2}'), \quad (12)$$

ширину верхньої частини паза приймають $b_{п2} = (0,5 - 0,6)$.

Площа поперечного переріза верхньої частини паза в штампі, мм^2 ,

$$S_{\text{п2 в}} = 0,5d_{\text{п2}}(h'_2 - 0,25d_{\text{п2}}). \quad (13)$$

Площа пляшкового паза, мм^2 ,

$$S_{\text{п2}} = S_{\text{п2 н}} + S_{\text{п2 в}}.$$

3. ОБМОТКА СТАТОРА

Елементом обмотки статора є котушка (секція). Кожний виток цієї котушки складається із двох пазових і двох лобових частин. Відстань між пазовими частинами однієї котушки, обмірювану в пазах, називають кроком обмотки. Крок обмотки y_1 може бути повним, якщо він дорівнює полюсному розподілу: $y_1 = \tau = z_1 / 2p$, або вкороченим, якщо він менше полюсного розподілу: $y_1 < \tau$. Укорочення кроку обмотки сприяє поліпшенню форми кривої розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі, наближаючи її до синусоїди. Це дозволяє знизити додаткові втрати й зменшити провали в механічній характеристиці двигуна. Котушки однієї фази обмотки, що розташовані в сусідніх пазах і з'єднані послідовно, утворюють котушкову групу. Котушкові групи, що входять в обмотку фази, з'єднуються між собою послідовно або паралельно. Три фази обмотки, з'єднані в зірку або трикутник, утворюють трифазну обмотку статора.

Котушкові групи обмотки, з'єднані між собою, утворюють паралельні галузі. Число паралельних галузей в обмотці однієї фази залежить від способу з'єднання котушкових груп: при послідовному з'єднанні мінімальне ($\alpha = 1$), при паралельному дорівнює числу полюсів $2p$.

Якщо пазові сторони котушок розташовані в пазах сердечника в один шар, то обмотку називають одношаровою, якщо у два шари, то двошаровою.

Одношарові обмотки статора не допускають укорочення кроку y_1 , тому двигуни з такими обмотками мають погіршені робочі й пускові показники, крім того, у них великий виліт лобових частин і підвищена витрата міді. Однак ці обмотки найбільш придатні для механізованого укладання, тому їх застосовують у двигунах із $h \leq 160$ мм. У двигунах із $h \geq 180$ мм використовують двошарові обмотки з укороченим кроком: $y_1 < \tau$.

Обмотки статора розділяються на всипні й обмотки із твердими котушками. Всипні виготовляють із обмотувального проведення круглого перетину. Проведення намотують на шаблон для додання котушці попередньої форми, потім котушки укладають у заздалегідь ізольовані пази трапецеїдальної форми, де їх закріплюють клинами, роблять формування лобових частин і бандажування. Обмотаний статор просочують. Всипні обмотки набули найбільшого застосування у двигунах потужністю до 100 кВт ($h \leq 250$ мм).

Обмотки із твердих котушок виконують із дроту прямокутного перетину. До укладання котушок у пази їм надають необхідну форму й наносять ізоляцію, потім укладають у напіввідчинені або відкриті пази.

Для вибору типу обмотки статора можна скористатися рекомендаціями табл.6.

Важливим етапом проектування обмотки статора є вибір класу нагрівостійкості й конструкції системи ізоляції. У двигунах з $h = 50\text{--}132$ мм застосовують систему ізоляції класу нагрівостійкості B , а у двигунах з $h = 160\text{--}355$ мм – класу нагрівостійкості F .

Приклади конструкції системи ізоляції обмоток статора дані в [2].

Число пазів на полюс і фазу

$$q_1 = \frac{z_1}{2p m_1},$$

де m_1 – число фаз.

Звичайно q_1 вибирають рівним цілому числу. Для числа пазів статора z_1 , відповідно до даних табл. 5, значення q_1 залежно від h наведені в табл. 8.

Таблиця 8

h , мм	Значення q при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50–63	4	2	2	–	–	–
71	4	2	2	1,5	–	–
80–100	4	3	2	1,5	–	–
112–132	4	3	3	2,0	–	–
160	6	4	3	2,0	–	–
180–225	6	4	4	3,0	–	–
250	8	5	4	3,0	–	–
280–355	8	5	4	3,0	3	2,5

Пазові сторони однієї котушкової групи, розташовані в сусідніх пазах, займають q_1 пазів і утворюють фазну зону, обумовлену кутом

$$\alpha = \frac{2\pi r q_1}{z_1}.$$

Найбільше застосування в трифазних двигунах одержали шестизонні обмотки з $\alpha = 60^\circ$.

Одним з параметрів обмотки статора є обмотувальний коефіцієнт k_{o61} . Для основної гармоніки ЕРС обмотки статора

$$k_{o61} = k_{y1} k_{p1},$$

де $k_{y1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ)$ – коефіцієнт укорочення; $\beta = y_1 / \tau$ – відносний крок обмоток, при $2p = 2$ $\beta = 0,58$ – $0,63$; при $2p = 4$ $\beta = 0,80$ – $0,89$; k_{p1} – коефіцієнт розподілу,

$$k_{p1} = \frac{\sin(\alpha / 2)}{q_1 \sin(\alpha / 2q_1)}.$$

У табл. 9 наведені рекомендовані значення k_{p1} , k_{y1} і k_{o61} для трифазних обмоток статора асинхронних двигунів.

Число ефективних провідників у пазу статора

$$u_{\pi} = \frac{10^{-3} A t_1 \alpha_1}{I_{\text{ном}}},$$

де $I_{1\text{ном}}$ – номінальний струм статора, А,

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{m_1 U_{1\text{ном}} \eta'_{\text{ном}} \cos \phi'_{1\text{ном}}}.$$

Отримане значення u_{π} округлюють до цілого числа (для двошарової обмотки – парного).

Таблиця 9

q_1	k_{p1}	$\frac{z_1}{2p}$	y_1	β	k_{y1}	$k_{об1}$	y_1	β	k_{y1}	$k_{об1}$
			$2p = 2$				$2p \geq 4$			
1,5	0,950	4,5	–	–	–	–	4	0,889	0,985	0,945
2,0	0,966	6,0	–	–	–	–	5	0,833	0,966	0,935
2,5	0,957	7,5	–	–	–	–	6	0,800	0,951	0,910
3,0	0,960	9,0	–	–	–	–	7	0,778	0,940	0,902
4,0	0,958	12,0	–	–	–	–	10	0,833	0,966	0,925
5,0	0,957	15,0	–	–	–	–	12	0,800	0,951	0,910
6,0	0,956	18,0	11	0,611	0,819	0,783	15	0,833	0,966	0,923
8,0	0,956	24,0	15	0,625	0,832	0,795	19	0,792	0,947	0,905

Число послідовних витків в обмотці фази статора

$$w_1 = \frac{pq_1 u_{\pi}}{a_1}.$$

Площа поперечного переріза ефективного провідника обмотки статора, мм²,

$$q_{1\text{еф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a_1 \Delta_1},$$

де Δ_1 – щільність струму в обмотці статора, А/мм².

По додатку в [2] вибирають найближчий по стандарту перетин і марку проводу й визначають його ізольований і неізольований діаметри. При виборі Δ_1 потрібно мати на увазі, що зі збільшенням Δ_1 зменшується витрата міді, але росте активний опір обмотки, а це веде до росту втрат і температури обмотки, до зниження ККД. Зі зменшенням Δ_1 збільшується ККД двигуна й

підвищується надійність обмотки за рахунок зниження температури. При виборі щільності струму в обмотках статора двигунів при ступені захисту IP44 можна керуватися рис. 6. Для двигунів ступеня захисту IP23 значення Δ_1 по рис. 6 варто збільшувати на 25 % при $2p = 2$ і на 20 % при $2p > 2$.

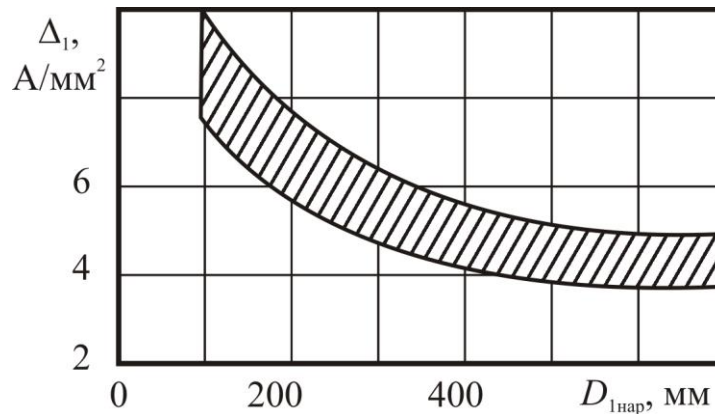


Рис. 6

При виконанні всипної обмотки діаметр ізолюваного проведення повинен бути $d_{із} \leq 1,766 \text{ мм}$ – при ручному укладанні котушок у пази статора й $d_{із} \geq 1,4 \text{ мм}$ – при машинній. Якщо ж за результатами розрахунку діаметр ефективного провідника виявився більше зазначених значень, то для полегшення процесу укладання котушок у пази статора ефективний провідник виконують із декількох елементарних провідників. Сумарна площа перетину елементарних провідників повинна бути не менше розрахункового перетину ефективного провідника. Перетин елементарного провідника, мм^2 ,

$$q_{\text{ел}} = \frac{q_{\text{леф}}}{n_{\text{ел}}},$$

де $n_{\text{ел}}$ – кількість елементарних провідників в одному ефективному.

При напіввідчинених пазах ефективний провідник повинен мати не менш двох елементарних. При виборі стандартного перетину прямокутного проводу вибирають і його розміри a й b . Розмір елементарного проводу по висоті (a) не

повинен перевищувати 2,5 мм. Для ослаблення ефекту витиснення струму прямокутний провід укладається пліском.

Площа поперечного переріза трапецеїдального напівзакритого паза, мм²,

$$S'_{\pi} = \frac{0,5(b_{\pi 1} + b'_{\pi 1})}{h_{\pi 1}} - S_{\pi.із} - S_{із.пр}.$$

Значення площ, займаних пазовою ізоляцією ($S_{\pi.із}$) і міжкотушковою прокладкою ($S_{із.пр}$) визначають по додатку [2].

Коефіцієнт заповнення паза

$$k_{з1} = \frac{n_{\pi} d_{із}^2}{S'_{\pi}},$$

де $n_{\pi} = u_{\pi} n_{ел}$ – число провідників у пазу; $d_{із}$ – діаметр ізольованого проведення, мм. Значення $k_{з1}$ повинне бути $0,7 \div 0,75$ при ручному укладанні обмотки статора й $0,7 \div 0,72$ – при машинній.

Якщо паз статора має прямокутну форму, то необхідно уточнити значення ширини $b'_{\pi 1}$ й висоти $h'_{\pi 1}$ паза в штампі:

$$b_{\pi 1} = 2b_{із} + b_{пр} + c_{b1}, \quad h'_{\pi 1} = h_{\pi 1} a_{із} + h_{пр} + c_{h1},$$

де $a_{із}, b_{із}$ – розміри прямокутного ізольованого проведення, мм; $b_{пр}, h_{пр}$ – припуски на штампування, мм; c_{b1}, c_{h1} – товщина ізоляції в пазу по ширині й висоті, мм (див. [2]). Отримані значення $b'_{\pi 1}$ й $h'_{\pi 1}$ повинні мало відрізнятися від значень $b_{\pi 1}$ і $h_{\pi 1}$, розрахованих по (5) і (6).

Після остаточного вибору розмірів обмотувального проведення $q_{1ел}$ й числа елементарних провідників $n_{эл}$ необхідно уточнити щільність струму $\Delta_1 = I_{1ном} / n_{ел} q_{1ел} a_1$, що не повинна перевищувати припустимих значень (див. рис. 6). Потім слід уточнити значення електромагнітних навантажень

$$A_1 = \frac{I_{1ном} u_{\pi} z_1}{10^{-3} \pi D_1 a_1}; \quad B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i 10^{-6}}, \quad (14)$$

де Φ – основний магнітний потік, Вб;

$$\Phi = \frac{k_E U_{\text{ном}}}{4k_g f_1 w_1 k_{\text{обл}}}.$$

Отримані по (14) значення A_1 і B_δ повинні мало відрізнятися від попередніх (бути в припустимі по рис. 1 межах).

Розміри м'яких катушок, мм, визначають у такий спосіб:

– середній зубцовий розподіл статора

$$t_{1cp} = \frac{\pi(D_1 + h_{z1})}{z_1};$$

– середня ширина катушки

$$b_{1cp} = t_1 y_{1cp},$$

де y_{1cp} – середнє значення кроку концентричної обмотки;

– середня довжина однієї лобової частини катушки

$$l_m = (1,16 + 0,14p)b_{1cp} + 15; \quad (15)$$

- середня довжина витка обмотки статора

$$l_{1cp} = 2(l_1 + l_{л1}). \quad (16)$$

Довжина вильоту лобової частини обмотки, мм:

$$\text{при } h \leq 132 \text{ мм} \quad l_{b1} = (0,19 + 0,1p)b_{1cp} + 10; \quad (17)$$

$$\text{при } h \geq 160 \text{ мм} \quad l_{b1} = (0,12 + 0,15p)b_{1cp} + 10. \quad (18)$$

Якщо обмотка статора виконана із твердих катушок, то довжина однієї лобової частини, мм,

$$l_m = 50 + h_{z1} + \frac{t_1 y_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3,5) / t_1]^2}}.$$

Довжину витка твердої катушки визначають по (16). Довжина вильоту лобової частини обмотки, мм,

$$l_{b1} = 25 + 0,5h_{z1} + \frac{y_1(b_{п1} + 3,5) / 2t_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3,5) / t_1]^2}}. \quad (19)$$

Активний опір фази обмотки статора, Ом,

$$r_1 = \frac{\rho_{Cu} w_1 l_{1cp} \cdot 10^3}{n_{ел} a_1 q_{1ел}},$$

де ρ_{Cu} – питомий електричний опір міді при розрахунковій температурі.

Відповідно до ДСТУ розрахункову робочу температуру приймають рівною 75°C для обмоток з ізоляцією класів *A*, *E* і *B* і 115°C для обмоток з ізоляцією класів *F* і *H*. Від робочої температури, що відповідає певному класу ізоляції, залежить питомий опір ρ провідників, значення якого наведені в табл.10.

Таблица 10

Температура, °З	$\rho \cdot 10^{-9}$ Ом·м	
	Мідне проведення	Лита алюмінієва клітка
20	17,5	36,6
75	21,3	46,5
115	24,4	48,8

Активний опір фази у відносних одиницях

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}},$$

де $U_{1ном}$ й $I_{1ном}$ – номінальні значення фазних напруги й струму.

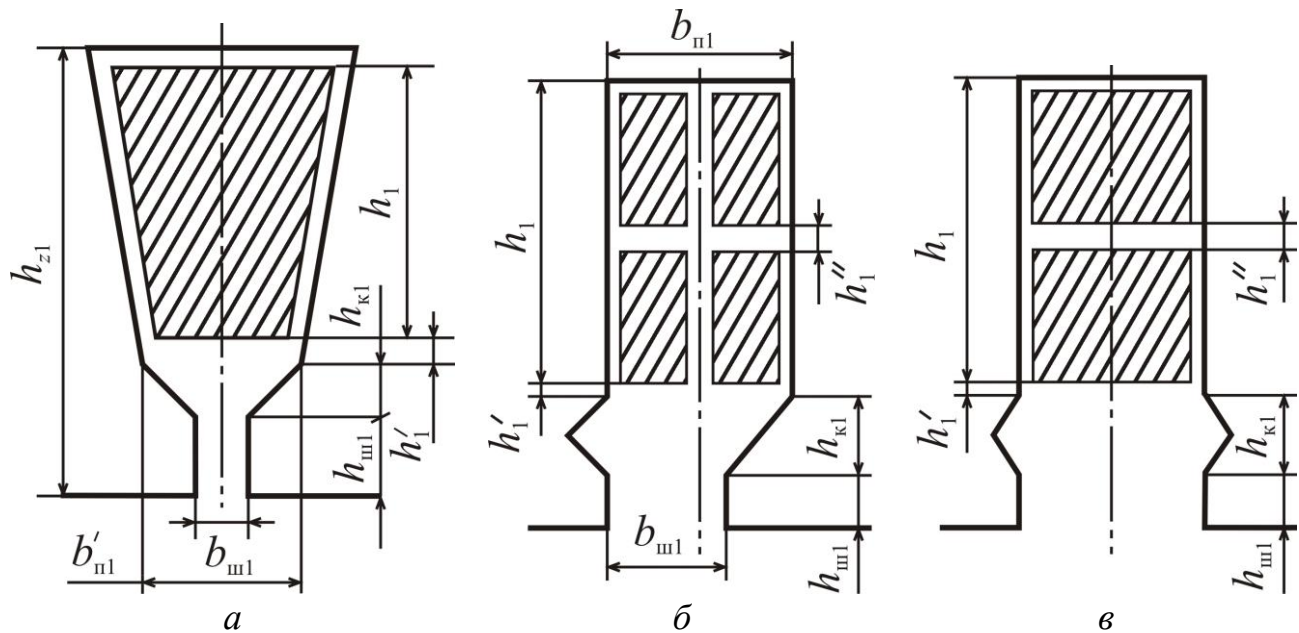


Рис. 7

Індуктивний опір розсіювання обмотки складається із трьох складових: пазового розсіювання, диференціального розсіювання й розсіювання лобових частин. Пазове розсіювання обумовлене магнітним потоком розсіювання, спрямованим поперек паза. Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання:

- при трапецеїдальному напівзакритому пазу (рис. 7, а)

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1}{3b'_{\text{п1}}} k_{\beta} + \left(\frac{h'_1}{b'_{\text{п1}}} + \frac{3h_{k1}}{b'_{\text{п1}} + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k'_{\beta};$$

- при прямокутному напіввідчиненому пазу (рис.7, б)

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h''_1}{3b_{\text{п1}}} k_{\beta} + \left(\frac{h'_1}{b_{\text{п1}}} + \frac{3h_{k1}}{b'_{\text{п1}} + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h''_1}{4b_{\text{п1}}};$$

- при прямокутному відкритому пазу (рис. 7, в)

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h''_1}{3b_{\text{п1}}} k_{\beta} - \frac{h'_1 + h_{k1} + h_{\text{ш1}}}{b_{\text{п1}}} k'_{\beta} + \frac{h''_1}{4b_{\text{п1}}},$$

де k_{β} й k'_{β} – коефіцієнти, що враховують укорочення кроку обмотки $\beta = y_1 / \tau$ (рис. 8).

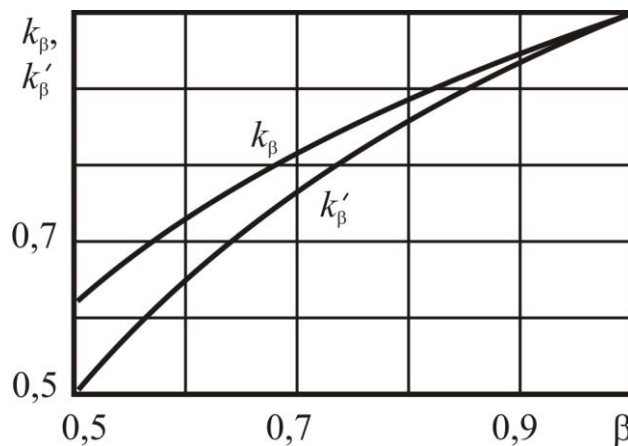


Рис. 8

Диференціальне розсіювання – це розсіювання, створюване вищими гармоніками магнітного поля в повітряному зазорі,

$$\lambda_{\sigma 1} = \frac{0,9 t_1 (q_1 k_{\sigma 1})^2 k_{pc1} k_{\sigma 1} k_{d1}}{\delta k_{\delta}}, \quad (20)$$

де k_{pc1} – коефіцієнт, що враховує демпфірувальну реакцію струмів, наведених в обмотці ротора вищими гармоніками поля статора (визначається по табл. 11); $k_{\sigma 1} = (1 - 0,033 b_{\sigma 1}^2) / t_1 \delta$ – коефіцієнт, що враховує вплив відкритих пазів статора на провідність диференціального розсіювання; k_{d1} – коефіцієнт диференціального розсіювання обмотки статора (визначається по табл. 12); k_{δ} – коефіцієнт повітряного зазору, що враховує вплив зубчатості статора й ротора на магнітний опір повітряного зазору,

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2}; \quad (21)$$

при напівзакритих і напіввідчинених пазах статора й напівзакритих пазах ротора

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\sigma 1}}{t_1 - b_{\sigma 1} + (5\delta t_1 / b_{\sigma 1})}; \quad k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\sigma 2}}{t_2 - b_{\sigma 2} + (5\delta t_2 / b_{\sigma 2})}.$$

Таблиця 11

q_1	Значення коефіцієнта k_{pc1} при z_2 / p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	$\frac{0,99}{0,94}$	$\frac{0,94}{0,87}$	—	—	—	—	—
3	$\frac{0,98}{0,92}$	$\frac{0,93}{0,87}$	$\frac{0,88}{0,84}$	$\frac{0,85}{0,78}$	—	—	—
4	—	$\frac{0,80}{0,75}$	$\frac{0,84}{0,77}$	$\frac{0,80}{0,75}$	$\frac{0,77}{0,72}$	—	—
5	—	—	—	$\frac{0,70}{0,62}$	$\frac{0,72}{0,67}$	$\frac{0,70}{0,65}$	—
6	—	—	—	$\frac{0,70}{0,62}$	$\frac{0,66}{0,60}$	$\frac{0,62}{0,58}$	—
8	—	—	—	—	—	$\frac{0,53}{0,47}$	$\frac{0,51}{0,46}$

Примітка. У чисельнику зазначені величини, що відносяться до двигунів, що мають скос пазів $\beta_{\text{ск}} \approx t_2$, а в знаменнику – до двигунів, що не мають скосу.

Таблиця 12

q_1	Значення $k_{\text{д1}}$ для обмотки	
	двошарової з укороченим кроком	одношарової з повним кроком
1,5	0,0450	–
2,0	0,0235	0,0285
2,5	0,0170	–
3,0	0,0111	0,0141
4,0	0,0062	0,0089
5,0	0,0043	0,0065
6,0	0,0030	0,0052
8,0	0,0021	–

При відкритих пазах статора й ротора замість $b_{\text{ш1}}$ і $b_{\text{ш2}}$ підставляють відповідно $b_{\text{п1}}$ й $b_{\text{п2}}$.

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання лобових частин обмотки статора

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \frac{q_1}{l_1} (l_{\text{м}} - 0,64\beta\tau).$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}. \quad (22)$$

Індуктивний опір розсіювання однієї фази обмотки статора, Ом,

$$x_1 = \frac{1,58 f_1 l_1 w_1^2}{p q_1 \cdot 10^8} \lambda_1, \quad (23)$$

у відносних одиницях

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}.$$

4. КОРОТКОЗАМКНЕНА ОБМОТКА РОТОРА

Короткозамкнену обмотку (клітку) ротора асинхронного двигуна з $h \leq 355$ виконують із алюмінію шляхом заливання сердечника ротора, тому розміри й форма стрижнів цієї обмотки визначаються розмірами й формою пазів сердечника ротора (див. рис. 5).

Номінальний струм в обмотці ротора, А,

$$I_2 = 1,1 I_{\text{ном}} \frac{m_1 w_1 k_{\text{об1}}}{m_2 w_2 k_{\text{об2}}} \cos \varphi'_1, \quad (24)$$

де при короткозамкненій обмотці $m_2 = z_2$; $w_2 = 0,5$; $k_{\text{об2}} = 1$.

Струм у стрижні ротора в номінальному режимі

$$I_{\text{ст}} = I_2 = 1,1 I_{\text{ном}} \frac{6 w_1 k_{\text{об1}}}{z_2} \cos \varphi'_1.$$

Щільність струму в стрижні, А/мм²,

$$\Delta_2 = \frac{I_2}{q_{\text{ст}}},$$

де $q_{\text{ст}}$ – перетин стрижня, мм², рівний площі паза ротора в штампі: $q_{\text{ст}} = S_{\text{п2}}$. При заливанні пазів алюмінієм щільність струму: $\Delta_2 \leq 2,5 - 3,5$ А/мм² для двигунів закритих обдуваних і $\Delta_2 \leq 3,0 - 4,0$ А/мм² для двигунів захищеного виконання. Менші значення Δ_2 відносяться до двигунів більшої потужності.

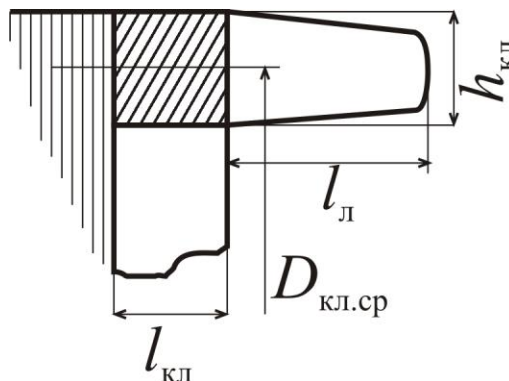


Рис. 9

Розміри короткозамкненого кільця литої клітки ротора (рис. 9):

– поперечний переріз кільця, мм²,

$$q_{\text{кл}} = (0,35 - 0,45) \frac{z_2 q_{\text{ст}}}{2p};$$

- довжина кільця, мм,

$$l_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}};$$

- висота кільця, мм,

$$h_{\text{кл}} = (1,1 - 1,25) h_{z2};$$

- середній діаметр кільця, мм,

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}}.$$

4.1. Овальні напівзакриті й закриті пази

Активний опір стрижня клітки ротора, Ом,

$$r_{\text{ст}} = \rho_{\text{л1}} l_2 k_{\text{вс}} \frac{10^3}{q_{\text{ст}}},$$

де $\rho_{\text{л1}}$ – питомий електричний опір литий алюмінієвої клітки при 75 або 115°C, Ом·м; $k_{\text{вс}}$ – коефіцієнт, що враховує витиснення струму в стрижні. Він являє собою відношення площі поперечного переріза стрижня $q_{\text{ст}}$ до площі перетину стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму:

$$k_{\text{вс}} = \frac{q_{\text{ст}}}{q_{\text{гп}}}. \quad (25)$$

Коефіцієнт $k_{\text{вс}}$ визначається тільки для пускового режиму, тому що в робочому режимі частота струму в роторі мала й тому $q_{\text{гп}} = q_{\text{ст}}$ й $k_{\text{вс}} = 1$.

Глибина проникнення струму в стрижень (рис. 10), мм,

$$h_{\text{гп}} = \frac{h_{\text{ст}}}{1 + \varphi}, \quad (26)$$

де φ – коефіцієнт, що знаходиться по кривих (рис. 11) залежно від значення коефіцієнта ξ , який характеризує ступінь підвищення активного опору ротора. Для алюмінієвої литої клітки при $f_1 = 50$ Гц і температурах 75 і 115°C він визначається:

$$\xi_{75} = 0,066 h_{\text{ст}} \sqrt{s}; \quad \xi_{115} = 0,064 h_{\text{ст}} \sqrt{s} \quad (27)$$

(s – ковзання).

Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму, мм,

$$b_{\text{гп}} = d'_{\text{п2}} - \frac{d'_{\text{п2}} - d_{\text{п2}}}{h_2} \left(h_{\text{гп}} - \frac{d'_{\text{п2}}}{2} \right). \quad (28)$$

Площа поперечного переріза стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму, мм²,

$$q_{\text{гп}} = 0,393 d_{\text{п2}}'^2 + \left[0,5 (d'_{\text{п2}} + b_{\text{гп}}) (h_{\text{гп}} - 0,5 d'_{\text{п2}}) \right]. \quad (29)$$

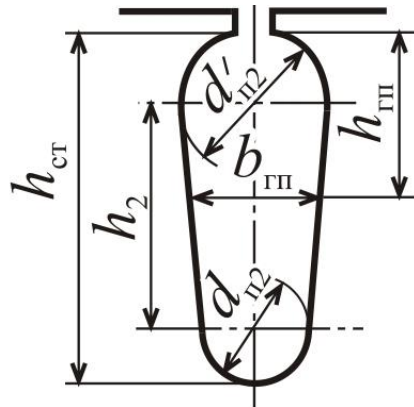


Рис. 10

Активний опір ділянки короткозамкненого кільця між сусідніми стрижнями при температурі 75 або 115°C, Ом,

$$r_{\text{кл}}^{\prime\prime} = \frac{2\pi D_{\text{кл.ср}} \rho_{\text{л1}} \cdot 10^3}{z_2 q_{\text{кл}}}, \quad (30)$$

де $\rho_{\text{л1}}$ – питомий опір алюмінієвої клітки, Ом·м, при 75 або 115°C.

Активний опір кілець, наведений до струму стрижня, Ом,

$$r_{\text{кл}}^{\prime\prime} = \frac{r_{\text{кл}}}{k_{\text{пр2}}^2}, \quad (31)$$

де $k_{\text{пр2}}$ – коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня:

$$\text{при } z_2 / 2p < 6 \quad k_{\text{пр2}} = 2 \sin \frac{180p}{z_2};$$

$$\text{при } z_2 / 2p > 6 \quad k_{\text{пр2}} = \frac{2\pi p}{z_2}.$$

Коефіцієнт скосу пазів ротора $k_{\text{ск}}$, визначається по центральному куті скосу $\alpha_{\text{ск}}$, рад, і табл. 13.

$$\alpha_{\text{ск}} = \frac{\pi 2 p \beta_{\text{ск}}}{z_2},$$

де $\beta_{\text{ск}} = t_1 / t_2$ – скос пазів у частках зубцового розподілу t_2 . Для двигунів з $2p = 2$ при скосі пазів ротора на один зубцовий розподіл статора приймають $k_{\text{ск}} = 1$.

Таблица 13

$\alpha_{\text{ск}}$	$k_{\text{ск}}$	$\alpha_{\text{ск}}$	$k_{\text{ск}}$	$\alpha_{\text{ск}}$	$k_{\text{ск}}$	$\alpha_{\text{ск}}$	$k_{\text{ск}}$	$\alpha_{\text{ск}}$	$k_{\text{ск}}$
0	1,000	0,4	0,995	0,8	0,974	1,2	0,941	1,6	0,897
0,1	1,000	0,5	0,991	0,9	0,967	1,3	0,932	1,7	0,884
0,2	0,999	0,6	0,986	1,0	0,959	1,4	0,921	1,8	0,870
0,3	0,998	0,7	0,980	1,1	0,951	1,5	0,909	1,9	0,856

Активний опір обмотки ротора, наведений до обмотки статора, Ом,

$$r_2' = k_{\text{пр1}} (r_{\text{ст}} + r_{\text{кл}}^{\prime\prime});$$

у відносних одиницях

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}};$$

коефіцієнт приведення опору обмотки ротора до обмотки статора

$$k_{\text{пр1}} = 4 \frac{m_1}{z_2} \left(\frac{w_1 k_{\text{ог1}}}{k_{\text{ск}}} \right)^2. \quad (32)$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора обумовлено наступними видами розсіювання: пазовим, лобовим, диференціальним і розсіюванням скосу пазів.

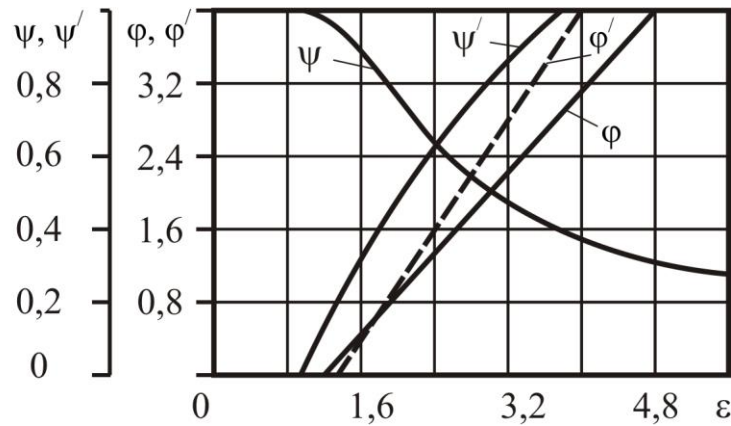


Рис. 11

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора:

– овального напівзакритого паза

$$\lambda_{п2} = C_{\lambda} + \frac{h_{м2}}{b_{м2}};$$

– овального закритого паза

$$\lambda_{п2} = C_{\lambda} + 0,3 + \frac{1,12h_{м2}10^3}{I^2}.$$

Тут

$$C_{\lambda} = \psi \left[\frac{h_2 + 0,4d_{п2}}{3d_{п2}'} \left(1 - \frac{\pi d_{п2}^{/2}}{8q_{ст}} \right) \right] + 0,66 - \frac{b_{м2}}{2d_{п2}'}. \quad (33)$$

Коефіцієнт ψ , що враховує зменшення провідності пазового розсіювання при витисненні струму в процесі пуску, визначають по рис. 11. Для номінального режиму $\psi = 1$.

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{д2} = 0,9t_2 \left(\frac{z_2}{6p} \right)^2 \frac{k_{д2}}{\delta k_{\delta}}, \quad (34)$$

де $k_{д2}$ – коефіцієнт диференціального розсіювання ротора, знаходять по рис. 12 залежно від $q_2 = z_2 / 3 \cdot 2p$.

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання:

- короткозамкнених кілець клітки ротора

$$\lambda_{кл} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{z_2 l_2 k_{пр2}^2} l q \frac{4,7D_{кл.ср}}{2h_{кл} + 2l_{кл}}; \quad (35)$$

- скосу пазів ротора

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2 \beta_{ск}^2}{9,58 k_{\delta} k'_{\mu}},$$

де k'_{μ} – попереднє значення коефіцієнт насичення магнітного ланцюга, приймають рівним 1,2 – 1,4.

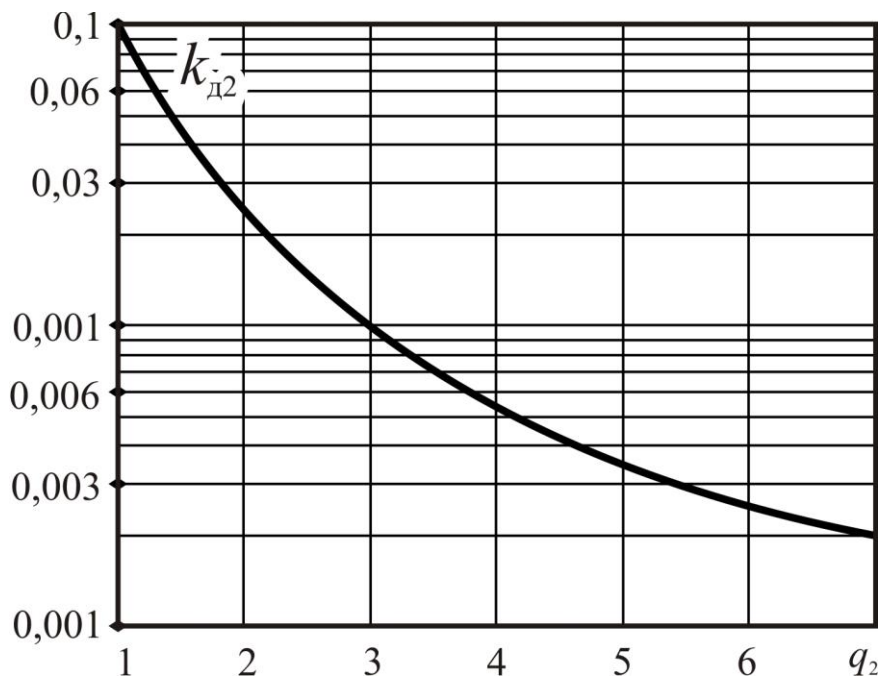


Рис. 12

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}. \quad (36)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, Ом,

$$x_2 = 7,9 f l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9},$$

наведене до обмотки статора

$$x_2' = k_{\text{пр1}} x_2, \quad (37)$$

$k_{\text{пр1}}$ – визначають по (32);

у відносних одиницях

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}.$$

4.2. Плешкові закриті пази

Активний опір стрижня у верхній частині паза при розрахунковій робочій температурі

$$r_{\text{ст.в}} = \rho_{\text{Al}} l_2 \frac{10^3}{q_{\text{ст.в}}};$$

для нижньої частини стрижня ($q_{\text{ст.н}}$) витиснення струму враховують тільки при $\xi > 1$ [див. (27)].

Активний опір нижньої частини стрижня, Ом,

$$r_{\text{ст.н}} = \rho_{\text{Al}} l_2 k_{\text{вс.н}} \frac{10^3}{q_{\text{ст.н}}},$$

де $k_{\text{вс.н}}$ – коефіцієнт витиснення струму в нижній частині стрижня, розрахунок якого ведеться лише при пуску двигуна (для номінального режиму $k_{\text{вс.н}} = 1$).

Розраховується $k_{\text{вс.н}}$ так само, як і $k_{\text{вс}}$ для стрижня з овальним пазом, при цьому розрахункову глибину проникнення в нижній частині стрижня визначають як різницю: $h_{\text{г.п.н.}} = h_{\text{г.п}} - (h_2' + 0,5d_{\text{п2}}')$, де $h_{\text{г.п}}$ – глибина проникнення струму в стрижень, розрахована по (26) при заміні ϕ на ϕ_1 (див. рис. 11).

При подальшому розрахунку у формулах (25), (28) і (29) величини $k_{\text{вс}}$, $q_{\text{с.т}}$, $q_{\text{г.п}}$ замінюють відповідно на $k_{\text{вс.н}}$, $q_{\text{ст.н}}$ і $q_{\text{г.п.н}}$. Активний опір короткозамикаючих кілець, наведений до струму стрижня, визначають по (30) і (31).

Активний опір, наведений до статора, Ом:

- верхньої частини клітки

$$r'_B = k_{\text{пр1}} r_{\text{ст.в}};$$

- нижньої частини клітки

$$r'_H = k_{\text{пр1}} r_{\text{ст.н}}.$$

Тут для визначення $k_{\text{пр1}}$ варто скористатися формулою (32), але при цьому потрібно прийняти $k_{\text{ск}} = 1$, тому що пляшкові пази на роторі застосовують у двигунів із $h \geq 250$ мм, у яких скосу пазів не роблять.

Активний опір ділянки короткозамкнених кілець між двома стрижнями, наведений до струму стрижня, $r''_{\text{кл}}$ – по (27) і (28), а потім цей опір приводять до статора:

$$r'_{\text{кл}} = k_{\text{пр1}} r''_{\text{кл}}.$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання нижньої частини клітки

$$\lambda_{\text{п2н}} = \left[\frac{h_2 + 0,4d'_{\text{п2}}}{3d_{\text{п2}}} \left(1 - \frac{\pi d_{\text{п2}}^2}{8q_{\text{ст.н}}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{п2}}}{2d_{\text{п2}}} \right] \psi' + \frac{h'_2 - 0,18}{2b_{\text{п2}}},$$

де ψ' – коефіцієнт, що характеризує зменшення провідності пазового розсіювання нижньої частини клітки внаслідок явища витиснення струму. Значення ψ' визначають по рис. 11 (при цьому ξ розраховують по (24) для всієї висоти стрижня): при $\xi \geq 1$ $\psi' = 1$.

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання взаємної індукції нижньої й верхньої частин стрижня

$$\lambda_{\text{2н.в}} = \frac{h'_2 - 0,1b_{\text{п2}}}{2b_{\text{п2}}} + 1,09 + 1,12 \frac{h_{\text{м2}}}{I_2} 10^3, \quad (38)$$

де I_2 – сумарний струм нижньої й верхньої частин стрижня, А.

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання $\lambda_{\text{д2}}$ визначають по (31), а коефіцієнт магнітної провідності розсіювання короткозамкнених кілець

$\lambda_{\text{кл}}$ – по (35). Коефіцієнт провідності магнітного розсіювання загального ланцюга ротора

$$\lambda_{20} = \lambda_{2\text{нв}} + \lambda_{\text{д}2} + \lambda_{\text{кл}}. \quad (39)$$

Індуктивний опір нижньої частини клітки, наведений до статора, Ом,

$$x'_{\text{н}} = x_1 \frac{\lambda'_{2\text{н}}}{\lambda_1}, \quad (40)$$

де $\lambda'_{2\text{н}}$ – наведений коефіцієнт провідності розсіювання нижньої частини клітки,

$$\lambda'_{2\text{н}} = \frac{\lambda_{2\text{н}} k_{\text{об}1}^2 l_2 z_1}{l_1 z_2}.$$

Індуктивний опір загального ланцюга ротора, наведений до статора, Ом,

$$x'_0 = x_1 \frac{\lambda'_{20}}{\lambda_1}, \quad (41)$$

де

$$\lambda'_{20} = \frac{\lambda_{20} k_{\text{об}1}^2 l_2 z_1}{l_1 z_2}.$$

Результуючий опір обмотки ротора, наведений до статора, визначають у відповідності зі схемою заміщення ротора із пляшковими пазами (рис. 13).

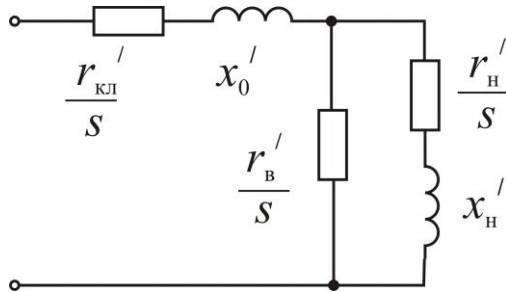


Рис. 13

Результуючий активний опір обмотки ротора, Ом,

$$r'_2 = \frac{1}{s} \left(r'_{\text{кл}} + \frac{r'_H r'_B}{r'_H + r'_B} \right);$$

при $s = 1$ активний опір нижньої частини стрижня $r'_H = \infty$, тому

$$r'_{2\text{н}} = r'_{\text{кл}} + r'_B.$$

Результуючий індуктивний опір, Ом,

$$x'_2 = x'_0 + x'_h \left(\frac{s_{п2н}}{s_{п2н} + s_{п2в}} \right)^2,$$

де $s_{п2н}$ й $s_{п2в}$ визначають відповідно по (12) і (13).

5. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА

Розрахунок магнітного ланцюга асинхронного двигуна виконують із метою визначення МРС і намагнічувального струму статора, необхідних для створення у двигуні необхідного магнітного потоку. Магнітна система двигуна являє собою розгалужений симетричний магнітний ланцюг, що містить $2p$ полюсів, тому розрахунок ведуть по розрахунковій ділянці магнітного ланцюга, що містить одну пару полюсів.

На рис. 14 представлена розрахункова ділянка магнітного ланцюга чотириполюсної машини, що складається з п'яти послідовно з'єднаних ділянок: повітряного зазору δ , зубцових шарів статора h_{z1} й ротора h_{z2} , спинки статора L_{c1} й спинки ротора L_{c2} . Тому МРС статора на пару полюсів $\sum F$ визначається як сума МРС всіх перерахованих ділянок магнітного ланцюга.

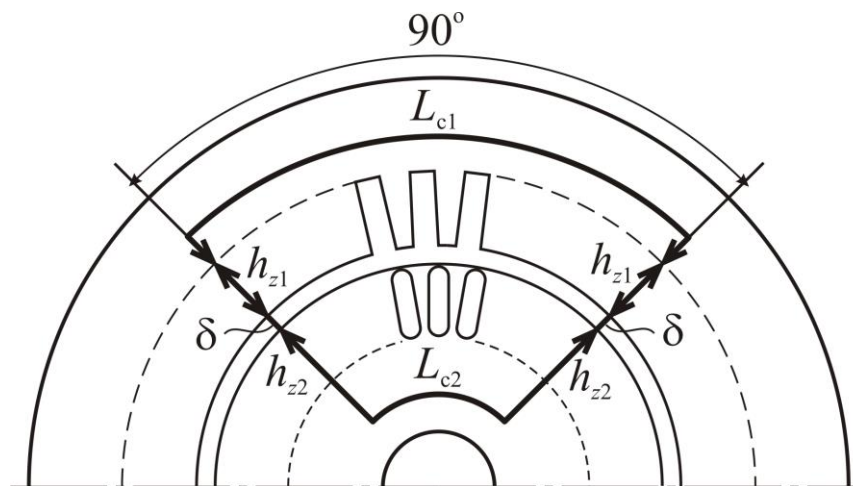


Рис. 14

Повітряний зазор. МРС повітряного зазору, А,

$$F_{\delta} = 0,8B_{\delta}\delta k_{\delta}10^3,$$

де k_{δ} – коефіцієнт повітряного зазору [по (21)]; – уточнене значення магнітної індукції [по (14)].

Зубцовий шар статора. При паралельних напівзакритих пазах статора (див. рис. 4,а) магнітна індукція, Тл, однакова по висоті зубця,

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta}t_1}{k_{c1}b_{z1}}.$$

Якщо $B_{z1} \leq 1,8$ Тл, то напруженість магнітного поля в зубці H_{z1} знаходять по таблицях намагнічування для зубців (див. додаток в [2]) залежно від прийнятої марки стали. Якщо ж $B_{z1} > 1,8$ Тл, то H_{z1} визначають по кривих намагнічування для зубців залежно від марки сталі й коефіцієнта $k_{п1}$, що враховує відгалуження частини магнітного потоку в паз статора,

$$k_{п1} = \frac{t_{1(1/3)}}{b_{z1}k_{c1}},$$

де $t_{1(1/3)}$ – зубцовий розподіл статора на висоті 1/3 зубця від найбільш вузької його частини, мм,

$$t_{1(1/3)} = \frac{\pi \left(D_1 + \frac{2}{3}h_{z1} \right)}{z_1}.$$

МРС зубцового шару статора, А,

$$F_{z1} = H_{z1}h_{z1}10^{-3}. \quad (42)$$

При прямокутних напіввідчинених і відкритих пазах статора (див. рис. 4, б, в) магнітна індукція, Тл, у мінімальному перетині зубця

$$B_{z1\max} = \frac{B_{\delta}t_1}{k_{c1}B_{z1\min}}.$$

При $B_{z1\max} \leq 1,8$ Тл напруженість поля H_{z1} визначають по таблицях намагнічування для зубців (див. додаток в [2]) по магнітній індукції в перетині зубця на висоті $1/3$ від найбільш вузької його частини, Тл,

$$B_{z1(1/3)} = \frac{B_{\delta} t_1}{k_{c1} b_{z1(1/3)}},$$

де $b_{z1(1/3)}$ – ширина зубця в розрахунковому перетині,

$$b_{z1(1/3)} = \frac{\pi \left(D_1 + \frac{2}{3} h_{z1} \right)}{z_1} - b_{п1}.$$

При $B_{z1} > 1,8$ Тл напруженість поля визначають у трьох поперечних перерізах зубця: мінімальному, шириною $b_{z1\min}$, обчисленому по (4); максимальному, $b_{z1\max} = t_1' - b_{п1}$, і середньому, $b_{z1cp} = 0,5(b_{z1\max} + b_{z1\min})$.

Максимальний зубцовий розподіл, мм,

$$t_1' = \frac{\pi(D_1 + 2h_{z1})}{z_1}.$$

Магнітна індукція в максимальному й середньому перетинах зубця, Тл:

$$B_{z1\min} = \frac{B_{\delta} t_1}{k_{c1} b_{z1\max}}; \quad B_{zcp} = \frac{B_{\delta} t_1}{k_{c1} b_{z1cp}}.$$

Потім по кривих намагнічування для зубців визначають напруженість поля $H_{z1\max}$, H_{z1cp} и $H_{z1\min}$, при цьому розрахунок коефіцієнтів, що враховують відгалуження магнітного потоку в паз, ведуть по формулах:

– для $B_{z1\max}$

$$k_{п1\max} = \frac{t_1}{b_{z1\min} k_{c1}};$$

– для $B_{z1\min}$

$$k_{п1\min} = \frac{t_1}{b_{z1\max} k_{c1}};$$

– для B_{z1cp}

$$k_{\text{плср}} = 0,5(k_{\text{плmax}} + k_{\text{плmin}}).$$

Якщо значення магнітної індукції в розрахункових перетинах зубця мало відрізняються від 1,8 Тл або менше 1,8 Тл, то відповідні значення напруженості поля визначають по таблицях намагнічування для зубців без розрахунку коефіцієнтів $k_{\text{плmax}}$, $k_{\text{плmin}}$ і $k_{\text{плср}}$.

Розрахункове значення напруженості поля в зубці статора, А/м,

$$H_{z1} = \frac{H_{z1\text{max}} + 4H_{z1\text{ср}} + H_{z1\text{min}}}{6}.$$

МРС зубцового шару статора визначають по (42).

Зубцовий шар ротора. При овальних напівзакритих, закритих пазах ротора (див. рис. 5, а, б) зубці мають паралельні стінки й магнітну індукцію в зубці, Тл,

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2}{k_{c2} b_{z2}}.$$

При $B_{z2} \leq 1,8$ Тл напруженість поля в зубці H_{z2} визначають по таблицях намагнічування для зубців, при $B_{z2} > 1,8$ Тл – по кривих намагнічування для зубців, при цьому коефіцієнт, що враховує відгалуження частини потоку в паз, знаходять по формулі

$$k_{\text{п2}} = \frac{t_{2(1/3)}}{k_{c2} b_{z2}},$$

де

$$t_{2(1/3)} = \frac{\pi \left(D_2 - \frac{2}{3} h_{z2} \right)}{z_2}.$$

МРС зубцового шару ротора при овальних пазах, А,

$$F_{z2} = H_{z2} (h_{z2} - 0,4d_{\text{п2}}) \cdot 10^{-3},$$

де $d_{\text{п2}}$ – діаметр малої окружності паза (див. рис. 5, а, б), мм.

Якщо пази ротора пляшкові закриті (див. рис. 5, в), то магнітна індукція в середньому перетині зубця верхньої частини паза

$$B_{z2b} = \frac{B_{\delta} t_2}{k_{c2} b_{z2b}}, \quad (43)$$

де

$$b_{z2b} = \frac{\pi(D_2 - h_{m2} - h_2')}{z_2} - d_{п2}'.$$

Напруженість поля H_{z2b} визначають по таблицях намагнічування для зубців [2].

МРС верхньої частини зубця, А,

$$F_{z2b} = H_{z2b} L_{z2b} \cdot 10^{-3},$$

де $L_{z2b} = h_2' + h_{m2}$, мм.

Магнітну індукцію в нижній частині пляшкового паза знаходять по (43), при цьому b_{z2b} заміняють на $b_{z2н}$:

$$b_{z2н} = \frac{\pi}{z_2} (D_2 - 2h_{m2} - 2h_2' - d_{п2}) - d_{п2}.$$

Якщо $B_{z2н} \leq 1,8$ Тл, то напруженість поля $H_{z2н}$ визначають по таблицях намагнічування для зубців, якщо $B_{z2н} > 1,8$ Тл, то по кривих намагнічування для зубців з використанням коефіцієнта, що враховує відгалуження частини потоку в паз,

$$k_{п2(1/2)} = \frac{t_{2н(1/2)}}{k_{c2} b_{z2н}},$$

де $t_{2н(1/2)} = (\pi / z_2)(D_2 - 2h_{z2} + h_2)$ – крок по нижній частині паза на висоті 1/2 від нижньої частини зубця, мм (див. рис. 5, з).

МРС нижньої частини зубця, А,

$$F_{z2н} = H_{z2н} L_{z2н} \cdot 10^{-3},$$

де

$$L_{z2н} = h_2 + 0,5(d_{п2} + d_{п2}'), \text{ мм.}$$

МРС зубцового шару ротора при пляшковому пазу, А,

$$F_{z2} = F_{z2b} + F_{z2н}.$$

Коефіцієнт магнітного насичення зубців двигуна

$$k_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}}.$$

Спинка статора. Магнітна індукція в спинці статора, Тл,

$$B_{c1} = \frac{0,5\alpha_i \tau B_{\delta}}{k_{c1} h_{c1}}. \quad (44)$$

Напруженість поля H_{c1} визначають у такий спосіб: при $2p \geq 4$, $2p = 2$ і $B_{c1} \leq 1,4$ Тл – по таблицях намагнічування для спинки машин змінного струму; при $2p = 2$ і $B_{c1} > 1,4$ Тл – по основних таблицях намагнічування (див. додаток в [2]), при цьому розрахункове значення B_{c1} по (44) зменшують на 0,4 Тл.

МРС спинки статора, А,

$$F_c = H_{c1} L_{c1} \cdot 10^{-3}, \quad (45)$$

де $L_{c1} = (\pi / 2p)(D_{1н} - h_{c1})$ – довжина середньої силової лінії в спинці статора, мм.

Спинка ротора. Магнітну індукцію в спинці ротора B_{c2} знаходять по (42), замінивши h_{c1} на h_{c2} й k_{c1} на k_{c2} . Напруженість поля H_{c2} визначають у такий спосіб: при $2p = 2$ – по основних таблицях намагнічування відповідної марки стали; при $2p \geq 4$ – по таблицях намагнічування для спинки машин змінного струму (див. додаток в [2]).

МРС спинки ротора, А,

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2} \cdot 10^{-3},$$

де $L_{c2} = (\pi / 2p)(D_2 - 2h_{z2} - h_{c2}) + h_{c2}$ – довжина середньої силової лінії в спинці ротора, мм; при наявності в сердечнику ротора аксіальних вентиляційних каналів діаметром d_{k2} приймають $L'_{c2} = L_{c2} + 1,3d_{k2}$.

Сумарна МРС на парі полюсів

$$\sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} + F_{c2};$$

коефіцієнт насичення магнітного ланцюга

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{2F_{\delta}},$$

звичайно $k_{\mu} = 1,7$.

Намагнічувальний струм статора

$$I_{\mu} = \frac{p \sum F}{0,9 m_1 w_1 k_{\text{об1}}},$$

у відсотках номінального струму –

$$I_{\mu\%} = \frac{I_{\mu}}{I_{\text{ном}}} 100\%.$$

Коефіцієнт магнітного розсіювання обмотки статора

$$\sigma_{\mu} = \frac{x_1}{x_m},$$

де x_1 – індуктивний опір фази обмотки статора [по (23)]; $x_m = k_E U_{\text{ном}} / I_{\mu}$ – індуктивний опір взаємної індукції обмотки статора, що відповідає основній гармоніці.

Якщо виявиться, що $k_{\mu} \geq 1,7$, а $\sigma_{\mu} > 0,05$, то визначають ЕРС холостого ходу, В:

$$E_0 = \frac{U_{1\text{ном}}}{1 + \sigma_{\mu}}.$$

Якщо отримані значення E_0 й $E = k_E U_{1\text{ном}}$ розрізняються більше чим на 5 %, то розрахунок магнітного ланцюга варто повторити при значенні магнітної індукції в зазорі B_{δ} , зміненої пропорційно відношенню E_0 / E .

6. ВТРАТИ Й ККД АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

При перетворенні енергії у двигуні виникають втрати потужності. Потужність на виході P_2 менше підведеної потужності P_1 на величину втрат $\sum P$: $P_2 = P_1 - \sum P$.

Втрати в електричній машині розділяються на основні й додаткові.

Основні втрати – це втрати, пов'язані з основними електромагнітними й механічними процесами, що відбуваються у двигуні. Вони розділяються на магнітні, електричні й механічні.

Основні магнітні втрати виникають у феромагнітних ділянках магнітного ланцюга при їхньому перемагнічуванні. Ці втрати складаються із втрат на гістерезис і втрат на вихрові струми в спинці й зубцовому шарі сердечника статора. Основні магнітні втрати в сердечнику ротора не враховують через їхнє мале значення, тому що частота перемагнічування ротора $f_2 = f_1 s$ мала. Номінальне ковзання при номінальному навантаженні становить $1 \div 6\%$, що відповідає частоті струму в роторі $f_2 = 0,5 \div 3,0$ Гц.

Основні магнітні втрати, Вт:

– у спинці статора

$$P_{MC1} = k_{M.T} P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta B_{C1}^2 G_{C1}; \quad (46)$$

– у зубцовом шарі статора,

$$P_{MZ1} = k_{M.T} P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta B_{Z1}^2 G_{Z1}; \quad (47)$$

тут $K_{M.T} = 1,7$ – технологічний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат через дефекти в сталі, що виникають при штампуванні аркушів, їхній зборці й наступній обробці; β – показник, що залежить від марки сталі; $P_{1,0/50}$ – питомі магнітні втрати, тобто втрати в 1 кг сталі при частоті 50 Гц у магнітному полі з індукцією 1,0 Тл. Їхнього значення для деяких марок електротехнічних сталей:

Марка стали	β	$P_{1,0/50}$, Вт/кг
2013	1,5	2,5
2211	1,5	2,6
2312	1,4	1,75
2411	1,3	1,6

Магнітні індукції в спинці статора B_{C1} і в зубцовому шарі статора B_{Z1} приймають із розрахунку магнітного ланцюга. При цьому якщо зубці статора мають паралельні стінки, те $B_{Z1} = B_{Z1(1/3)}$.

При частоті 50 Гц у формулах (46) і (47) $(f_1 / 50)^\beta = 1$.

Розрахункові маси, кг, сталі спинки статора G_{C1} й зубцового шару G_{Z1} визначаються по формулах

$$G_{C1} = 7,8 \cdot 10^{-6} t_1 k_{C1} \pi (D_{1H} - h_{C1});$$

$$G_{Z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} t_1 k_{C1} [h_{Z1} \pi (D_1 + h_{Z1}) - s_{П1} z_1],;$$

де $s_{П1}$ – площа паза, мм² [по (3)].

Основні магнітні втрати у двигуні, Вт,

$$P_M = P_{MC1} + P_{MZ1}; \quad (48)$$

Основні електричні втрати - це втрати на нагрівання обмоток статора й ротора. Вони визначаються по формулах:

$$P_{e1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (49)$$

- в обмотці ротора

$$P_{e2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'; \quad (50)$$

тут r_1 і r_2' – активні опори, Ом, фазних обмоток статора й ротора, наведені до розрахункової робочої температури, що відповідає класу нагрівостійкості ізоляції двигуна.

Електричні втрати в обмотці ротора можна також визначити по формулі

$$P_{e2} = s P_{cm}, \quad (51)$$

де $P_{\text{ем}} = P_1 - P_{\text{м}} - P_{\text{ел}}$ – електромагнітна потужність двигуна;

$P_1 = m_1 I_1 U_{\text{ном}} \cos \varphi_1$ – потужність, подводима до двигуна з мережі, Вт.

Основні механічні втрати у двигуні – це втрати на тертя в підшипниках і на вентиляцію. Для асинхронних двигунів зі ступенем захисту IP44 їх можна визначити по формулі

$$P_{\text{Мех}} = k_T (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_{1H} \cdot 10^{-2})^4, \quad (52)$$

де $k_T = 1,3(1 - D_{1H} \cdot 10^{-3})$ при $2p = 2$; $k_T = 1$ при $2p > 2$.

Основні механічні втрати двигунів зі ступенем захисту IP23 і вентиляційними лопатками на короткозамикаючих кільцях

$$P_{\text{Мех}} = k_T (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_1 \cdot 10^{-5})^4 \cdot 10^{-3}, \quad (53)$$

при цьому якщо $2p = 2$, $k_T = 6$ при $D_1 > 250$ мм;

$k_T = 5$ при $D_1 < 250$ мм;

якщо $2p > 2$, $k_T = 7$ при $D_1 > 250$ мм;

$k_T = 6$ при $D_1 < 250$ мм.

Додаткові втрати виникають через вищі гармоніки МРС обмоток, потоку розсіювання обмоток, пульсації магнітного поля в повітряному зазорі, витиснення струму в провідниках і інших неосновних електромагнітних процесів у двигуні. Додаткові втрати асинхронних двигунів відповідно до ДСТУ 11828–75 приймають рівними 0,5% споживаної двигуном потужності P_1 у номінальному режимі, Вт:

$$P_{\text{дод}} = \frac{0,005 P_1 \cdot 10^3}{\eta'_{\text{ном}}}, \quad (54)$$

де $\eta'_{\text{ном}}$ – попередній номінальний ККД двигуна.

При розрахунку додаткових втрат для неномінального режиму роботи двигуна можна скористатися формулою

$$P'_{\text{дод}} = P_{\text{дод}} \left(\frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} \right)^2, \quad (55)$$

с деяким наближенням ці втрати можна визначити й так:

$$P'_{\text{дод}} \approx P_{\text{дод}} \left(\frac{P_2}{P_{\text{ном}}} \right)^2.$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}, \quad (56)$$

де

$$\sum P = (P_{\text{М}} + P_{\text{Е1}} + P_{\text{Е2}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{дод}}) 10^{-3} \quad (57)$$

– сумарні втрати у двигуні, кВт; $P_1 = P_2 + \sum P$ – підведена до двигуна потужність, кВт.

7. СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Асинхронний двигун може працювати в діапазоні навантажень від холостого ходу до номінальної. При цьому його основні параметри – споживаний струм I_1 , потужність P_1 , частота обертання n_2 , ККД η , коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, ковзання й інші – перебувають у певній залежності від навантаження на валу двигуна P_2 . Залежності цих величин від корисної потужності називають робочими характеристиками асинхронного двигуна.

Існує два методи розрахунку робочих характеристик: графічний (по круговій діаграмі) і аналітичний. В основу визначення їхньої покладена схема заміщення (рис. 15, а). Більше зручна для практичного використання схема заміщення, показана на малюнку 15, б.

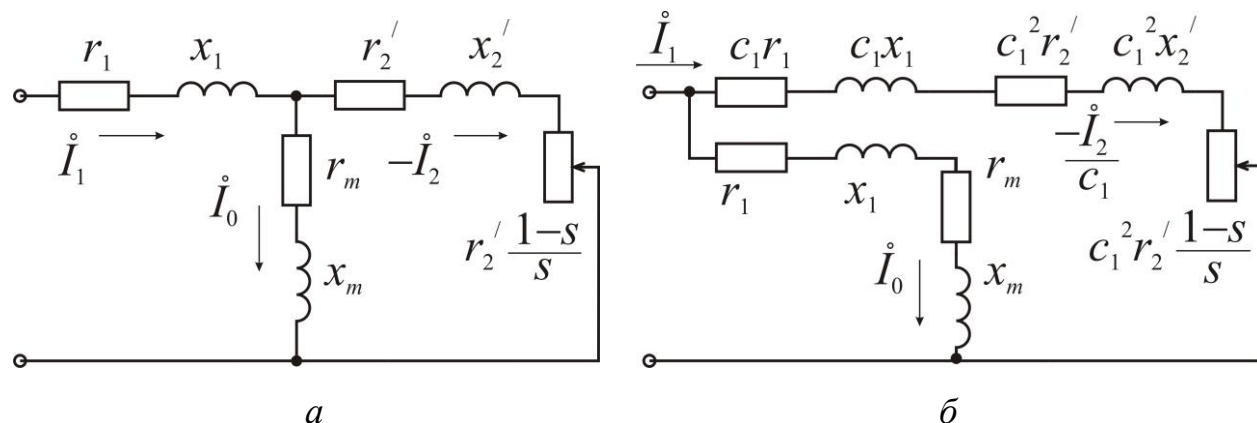


Рис. 15

Однак розрахунок цієї перетвореної схеми заміщення вимагає визначення коефіцієнта C_1 , для двигунів потужності більше 1 кВт його з достатньою точністю можна одержати по формулі

$$C_1 \approx 1 + (x_1 / x_m).$$

Опори схеми заміщення r_1 , x_1 , r_2' , x_2' і x_m розраховують по формулах, наведеним у розд. 3 і 4. Активний опір ділянки намагнічування схеми заміщення приблизно можна визначити в такий спосіб:

$$r_m \approx \frac{P_M}{m_1 I_\mu^2},$$

де P_M – основні магнітні втрати, Вт; I_μ – намагнічувальний струм статора, А.

При використанні схеми заміщення для визначення робочих характеристик виходять із пропозиції, що параметри схеми заміщення зі зміною навантаження двигуна залишаються постійними. Однак аналіз роботи двигуна показує, що з ростом струму в обмотках збільшується насичення зубцового шару від магнітних полів розсіювання, крім того, при більших ковзаннях варто враховувати ефект витиснення струму в стрижнях обмотки ротора. У підсумку зріст навантаження двигуна супроводжується деяким зменшенням індуктивного опору й збільшенням активного опору ротора.

Для двигунів загального призначення з деяким допущенням можна вважати параметри заміщення незмінними в діапазоні навантажень від $s = 0$ до

$s = s_{кр}$ ($s_{кр}$ – критичне ковзання, що відповідає максимальному електромагнітному моменту двигуна). При $s = s_{кр}$ вплив перерахованих вище факторів на параметри схеми заміщення настільки значний, що потрібно їхнє перерахування.

8. ПОБУДОВА КРУГОВОЇ ДІАГРАМИ

Для побудови спрощеної кругової діаграми асинхронного двигуна необхідно визначити наступні величини:

– електричні втрати в обмотці статора в режимі холостого ходу, Вт,

$$P_{e10} = m_1 I_0'^2 T_1,$$

де I_0' – струм ідеального ходу, А, тобто струм холостого ходу, що відповідає синхронній частоті обертання ротора. Приблизно можна прийняти $I_0' \approx I_\mu$ (I_μ – намагнічувальний струм статора);

– втрати в режимі холостого ходу, Вт,

$$P_0 = P_{e10} P_M + P_{МЕХ};$$

– активну складову струму холостого ходу, А,

$$I_{oa} = \frac{P_0}{m_1 U_{1НОМ}};$$

– струм холостого ходу, А,

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_\mu^2};$$

– коефіцієнт потужності холостого ходу

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{oa}}{I_0};$$

– індуктивний і активний опір короткого замикання, Ом, що відповідає параметрам схеми заміщення при $s \leq s_{кр}$,

$$x_k' = c_1 x_1 + c_1^2 x_2'; \quad r_k' = c_1 r_1 + c_1^2 r_2'.$$

Порядок побудови кругової діаграми наступний (рис. 16).

Проводимо осі координат. На осі ординат відкладаємо вектор напруги $U_{1\text{НОМ}}$. Потім, вибравши масштаб струму m_i , А/мм, проводимо вектор струму I_0 (відрізок OH) під кутом φ_0 до осі ординат. Із точки холостого ходу H проводимо пряму, паралельну осі абсцис, на ній відкладемо відрізок HC , що є діаметром окружності струму, мм:

$$D_i = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{x'_k} : m_i.$$

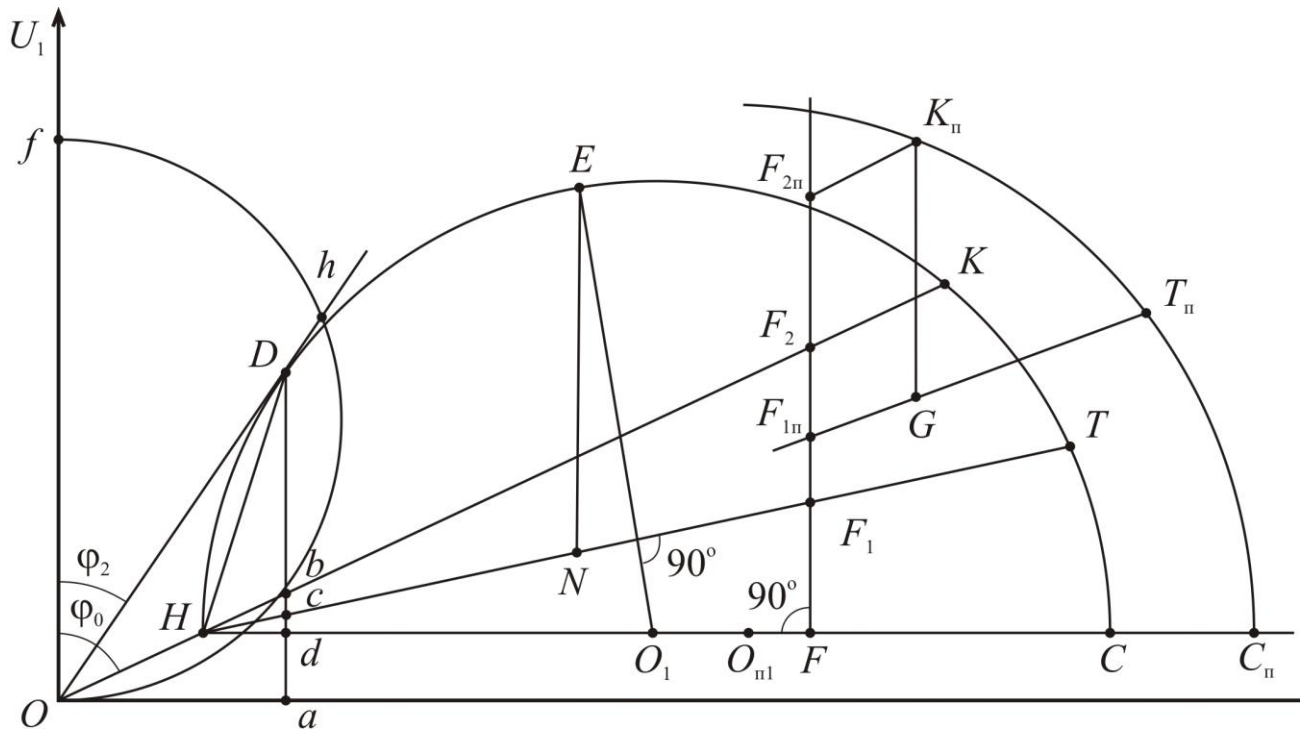


Рис. 16.

Для підвищення точності при визначенні характеристик по круговій діаграмі треба масштаб струму m_i приймати таким, щоб діаметр окружності струму D_i був не менш 200 мм; всі побудови варто вести гостро відточеним олівцем.

Розділивши відрізок HC на дві рівні частини, одержимо точку O_1 – центр окружності струмів, з якої радіусом $D_i/2$ проведемо окружність струму. На прямій O_1C (до точки F) відновимо перпендикуляр, на якому відкладемо відрізки, мм,

$$FF_1 = r_1' \frac{HF}{x_k'}; FF_2 = r_k' \frac{HF}{x_k'};$$

Із точки H через точки F_1 і F_2 проведемо прямі до перетинання з окружністю струму в точках T і K . Точка T відповідає ковзанню $S = \pm\infty$, пряма HT є лінією електромагнітної потужності (моменту); точка K – точка короткого замикання – відповідає ковзанню $s = 1$, а пряма HK – лінія корисної потужності.

Побудована кругова діаграма може бути використана для знаходження параметрів і одержання робочих характеристик двигуна при навантаженнях до $S_{кр}$.

Із точки O_1 опустимо перпендикуляр на лінію електромагнітної потужності HT і продовжимо його до перетинання з окружністю струмів у точці E . Точка E на окружності струмів відповідає максимальному моменту двигуна. Таким чином, для одержання параметрів робочих характеристик по круговій діаграмі використовують ділянку HE окружності струмів.

Розглянемо порядок визначення параметрів двигуна для режиму його роботи, що відповідає точці D на окружності струмів.

Струми. З'єднавши точку D із точками H і O , одержимо трикутник струмів ODH сторонами якого є струм статора $I_1 = OD \cdot m_i$, струм холостого ходу $I_0 = OH \cdot m_i$ й струм ротора $I_2' / c_1 = HD \cdot m_i$. Опустивши перпендикуляр із точки D на вісь абсцис Da , одержимо прямокутний трикутник ODa , катети якого визначають активні $I_{1a} = Da \cdot m_i$ й реактивну $I_{1p} = Oa \cdot m_i$ складові струму статора.

Підведена потужність P_1 . Відомо, що $P_1 = m_i U_{1ном} I_1 \cos \phi_1$, але тому що $U_{1ном} = const$, а $I_1 \cos \phi_1 = I_{a1}$, то потужність P_1 прямо пропорційна активній складовій струму статора. Отже,

$$P_1 = Da \cdot m_p$$

де $m_p = m_i \cdot U_{1ном} m_i \cdot 10^{-3}$ – масштаб потужності, кВт/мм.

Підведену потужність розраховують від осі абсцис, що називають лінією підведеної потужності, до заданої крапки на окружності струмів.

Корисна потужність P_2 . Корисну потужність на круговій діаграмі відраховують по вертикалі від крапки D до лінії корисної потужності HK . Для заданої крапки на окружності струму

$$P_2 = m_p \cdot Db.$$

Електромагнітна потужність і електромагнітний момент. Для заданої крапки D електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = Dc \cdot m_p, \quad (58)$$

електромагнітний момент двигуна

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega_1} = 30 \frac{P_{\text{ем}}}{\pi n_1} = 30 m_p \frac{Dc}{\pi n_1}.$$

або

$$M = m_m \cdot Dc,$$

де m_m – масштаб моментів, Н·м/мм; $m_m = 30 m_1 \frac{U_{\text{НОМ}} m_i}{\pi n_1}$.

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Для його визначення на осі ординат будуємо півколо довільного діаметра. Тоді для заданої крапки D одержимо $\cos \varphi_1 = Oh / Of$. Для зручності розрахунків доцільно діаметр Of прийняти рівним 100мм. В цьому випадку $\cos \varphi_1 = Oh / 100$.

Коефіцієнт корисної дії. Відомо, що $\eta = P_2 / P_1$. На круговій діаграмі $P_2 = Db \cdot m_p$, а $P_1 = Da \cdot m_p$, тоді

$$\eta = \frac{Db}{Da}.$$

Розрахунок ККД цим способом дає погрішність, тому що враховуються не всі види втрат (наприклад, додаткові втрати). Помилки тим більше, чим вище ККД, тому ККД асинхронних двигунів варто визначати по (56).

Перевантажувальна здатність двигуна. Відрізок EN у масштабі моментів визначає максимальний момент двигуна, $\text{Н} \cdot \text{м}$,

$$M_{\max} = m_m \cdot EN.$$

Якщо точка D на окружності струму відповідає номінальному струму, то перевантажувальна здатність двигуна визначається відношенням

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{EN}{Dc}.$$

Перевантажувальна здатність асинхронних двигунів приблизно $1,7 \div 2,1$.

Ковзання. Визначивши електричні втрати в обмотці ротора, Вт,

$$P_{e2} = m_1 I_2'^2 r_2',$$

де $I_2' = (HD / c_1) \cdot m_i$ – визначається по круговій діаграмі.

Знайдемо ковзання двигуна

$$s = \frac{P_{e2}}{P_{\text{ем}}},$$

де електромагнітну потужність $P_{\text{ем}}$ можна обчислити по (58).

9. РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Робочі характеристики являють собою залежності $I_1, P_1, s, \eta, \cos \phi_1, n_2 = f(P_2)$. Для їхньої побудови задаються рядом значень струмів статора, наприклад: 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 $I_{\text{НОМ}}$. Використовуючи масштаб струму m_i , визначають відрізки для зазначених значень струму, мм:

$$\begin{aligned} OD_{0,5} &= m_i 0,5 I_{\text{НОМ}}; OD_{1,0} = m_i I_{\text{НОМ}}; \\ OD_{0,75} &= m_i 0,75 I_{\text{НОМ}}; OD_{1,25} = m_i 1,25 I_{\text{НОМ}}. \end{aligned}$$

Відклавши ці відрізки із точки O до перетинання з окружністю струмів, одержимо точки $D_{0,5}, D_{0,75}, D_{1,0}$ і $D_{1,25}$. Відповідно до вказівок розд. 8 для кожної із цих крапок визначимо необхідні параметри, занесемо їх у табл. 14, а потім побудуємо робочі характеристики двигуна. Як ми вже відзначали, для

побудови робочих характеристик використовується лише ділянка HE окружності струмів, але саме ця ділянка діаграми навіть при більших діаметрах окружності струмів – невеликий, а відстані між лініями корисної, електромагнітної, підведеної потужності настільки малі, що вимір відрізків між ними дає значні похибки.

Таблиця 14

Параметр	Значення при $I_1 / I_{\text{НОМ}}$				
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
OD , мм					
Oh , мм					
Db , мм					
Dc , мм					
Da , мм					
HD , мм					
$I_2' = m_i \frac{HD}{r_1}$, А					
$P_1 = m_p Da \cdot 10^{-3}$, кВт					
$P_2 = m_p Db \cdot 10^{-3}$, кВт					
$P_{\text{эм}} = m_p Dc \cdot 10^{-3}$, кВт					
$M = m_m Dc$, Н·м					
$P_{\text{э2}} = m_1 I_2'^2 r_2'^2$, Вт					
$S = P_{\text{э2}} / P_{\text{эм}}$					
$n_2 = n_1 (1 - S)$, об/хв					
$P_{\text{э1}} = m_1 I_1^2 r_1^2$, Вт					
$P_{\text{доб}}' = P_{\text{доб}} (I_1 / I_{\text{НОМ}})$, Вт					
$\sum P$, кВт					
$\eta = P_2 / (P_2 + \sum P)$					
$\cos \phi_1 = Oh / Of$					

Для усунення цього недоліку доцільно, користуючись принципом подоби, збільшити «робочу» частину діаграми у два-три рази і побудувати її окремо (рис. 17). При цьому, збільшивши діаметр окружності струмів, необхідно кути між векторами й лініями потужностей зберегти незмінними. Використовуючи цю «робочу» частину діаграми, масштаб струму, А/мм, потрібно змінити, прийнявши

$$m'_i = m_i \frac{D_i}{D'_i},$$

де m_i – масштаб струмів на вихідній (повній) діаграмі, А/мм; D_i – діаметр окружності струмів вихідної (повної) діаграми, мм; D'_i – діаметр окружності струмів на «робочій» ділянці діаграми, мм.

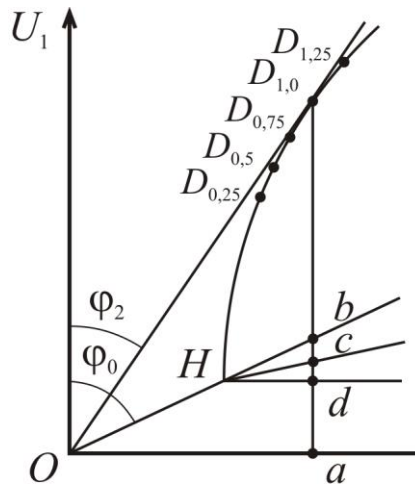


Рис. 17

Визначення параметрів робочих характеристик за допомогою «робочої» ділянки діаграми виконують у викладеній вище послідовності, але зі зміненими значеннями масштабів: струмів $m'_i = m_i (D_i / D'_i)$, потужностей

$$m'_p = m_1 \cdot U_{\text{ном}} \cdot m'_i, \text{ моменту } m'_m = 30 m_1 \cdot U_{\text{ном}} (m'_i / \pi m_1).$$

За отриманим даними, занесеним у табл. 14, будують робочі характеристики двигуна (рис. 18).

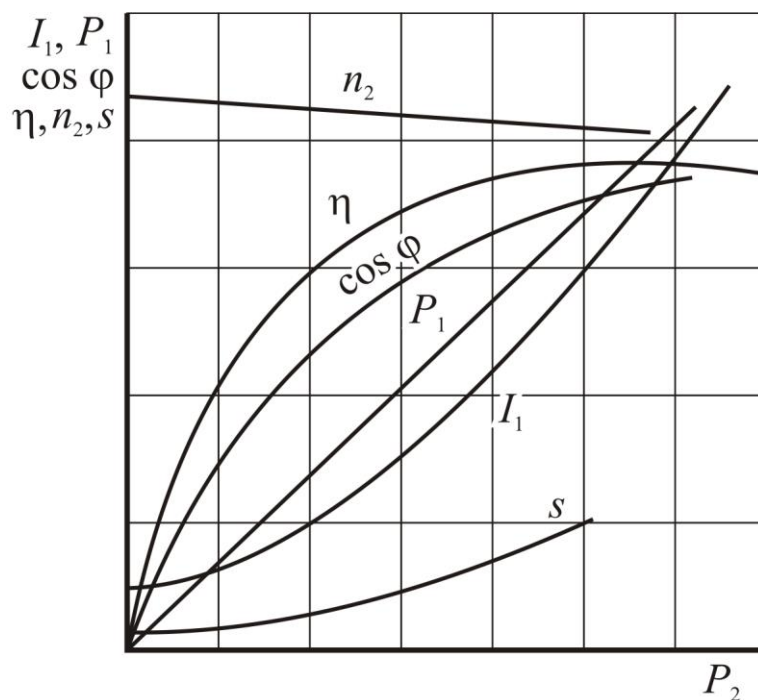


Рис. 18

Погрішності розглянутої кругової діаграми, обумовлені деякими спрощеннями в розрахунках параметрів схеми заміщення з винесеним намагнічувальним контуром, звичайно помітні для двигуна невеликої потужності. Ці погрішності практично усуваються, якщо центр окружності струму O'_1 розташувати по лінії HC' (рис. 19), нахиленої до лінії HC під кутом 2γ ,

$$\gamma = \arcsin \frac{I_0 r_1}{U_{\text{ном}}}.$$

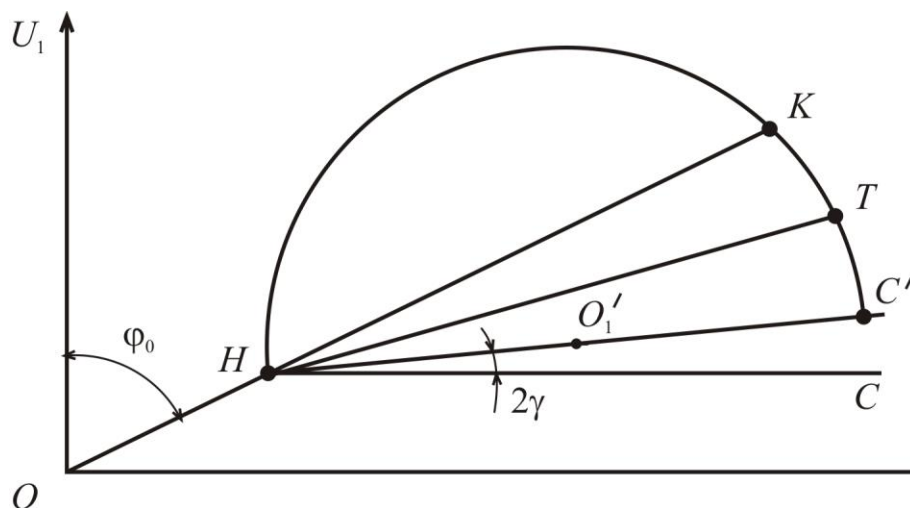


Рис. 19

10. ПУСКОВІ ПАРАМЕТРИ

Активний опір короткого замикання при пуску двигуна ($s=1$) з урахуванням явища витиснення струму, Ом,

$$r'_{\text{кп}} = c_1 r_1 + c_1^2 r'_{2\text{п}},$$

де $r'_{2\text{п}}$ – активний опір обмотки ротора при пуску двигуна,

$$r'_{2\text{п}} = \kappa_{\text{пр1}} (\kappa_{\text{вт}} r_{\text{ст}} + r''_{\text{кл}}).$$

Магнітне насичення зубцового шару знаходять через постійну й змінну складові індуктивного опору статора й ротора.

Змінні складові індуктивних опорів визначаються коефіцієнтами магнітної провідності розсіювання, які залежать від насичення, тобто коефіцієнтами диференціального розсіювання статора й ротора, і частково коефіцієнтами пазового розсіювання, пов'язаними з розсіюванням клинної частини й шліца пазів статора й ротора, містків закритих пазів ротора.

Постійні складові індуктивних опорів визначаються коефіцієнтами магнітної провідності, які не залежать від насичення, тобто коефіцієнтами лобового розсіювання короткозамикаючих кілець і розсіювання скосу пазів ротора, пов'язаними з розсіюванням частини паза, зайнятого обмоткою або стрижнем.

Змінна складова коефіцієнта пазового розсіювання статора, що залежить від насичення:

– для трапецеїдального напівзакритого паза (див. рис. 4, а)

$$\lambda_{\text{п1зм}} = \left(\frac{3h_{\text{к}}}{b'_{\text{п}} + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k'_{\beta};$$

– для прямокутного напіввідчиненого паза (див. рис. 4, б)

$$\lambda_{\text{п1зм}} = \left(\frac{3h_{\text{к1}}}{b_{\text{п1}} + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k'_{\beta};$$

– для прямокутного відкритого паза (див. рис. 4, в)

$$\lambda_{\text{п13м}} = \frac{h_{\text{к1}} + h_{\text{ш1}}}{b_{\text{п1}}} k_{\beta}'.$$

Коефіцієнт k_{β}' для двошарової обмотки з укороченим кроком визначають по рис. 8, а для одношарових обмоток $k_{\beta}' = 1$.

Змінна складова коефіцієнта провідності розсіювання статора

$$\lambda_{13\text{м}} = \lambda_{\text{п13м}} + \lambda_{\text{д1}},$$

де $\lambda_{\text{д1}}$ – коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання [по (20)].

Змінна складова коефіцієнта пазового розсіювання ротора, що залежить від насичення:

– для овального напівзакритого паза (див. рис. 5, а)

$$\lambda_{\text{п23м}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}};$$

– для овального закритого й пляшкового пазів (див. рис. 5, б, в, г)

$$\lambda_{\text{п23м}} = 1,12 \cdot 10^3 \frac{h_{\text{м2}}}{I_2},$$

де I_2 – струм у стрижні ротора, А [по (24)].

Змінна складова коефіцієнта провідності розсіювання ротора

$$\lambda_{23\text{м}} = \lambda_{\text{п23м}} + \lambda_{\text{д2}},$$

де $\lambda_{\text{д2}}$ – коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання [по (34)].

Змінна складова індуктивного опору двигуна, Ом:

– для короткозамкненого ротора з овальними напівзакритими або закритими пазами

$$x_{3\text{м}} = \frac{c_1 x_1 \lambda_{13\text{м}}}{\lambda_1} + \frac{c_1^2 x_{2\text{п}}' \lambda_{23\text{м}}}{\lambda_2}; \quad (59)$$

– для короткозамкненого ротора із пляшковими закритими пазами

$$x_{3M} = \frac{c_1 x_1 \lambda_{13M}}{\lambda_1} + \frac{c_1 x'_0 \lambda_{23M}}{\lambda_{20}};$$

тут $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{20}$ знаходять відповідно по (22), (36), (39); x_1, x'_2, x'_0 – по (23), (37), (41). При розрахунку λ_2 коефіцієнт ψ в (33) визначають по кривій $\psi = f(\xi)$ (див. рис. 11) для пускового режиму ($s = 1$).

Постійна складова індуктивного опору двигуна, що не залежить від насичення, Ом:

– для короткозамкненого ротора з овальними напівзакритими або закритими пазами

$$x_{\text{пост}} = c_1 x_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{13M}}{\lambda_1} + c_1^2 x'_{2п} \frac{\lambda'_2 - \lambda_{23M}}{\lambda'_2}; \quad (60)$$

– для короткозамкненого ротора із пляшковими закритими пазами

$$x_{\text{пост}} \approx c_1 x_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{13M}}{\lambda_1} + c_1^2 x'_0 \frac{\lambda_{20} - \lambda_{23M}}{\lambda'_2} + c_1^2 x'_n \frac{s_{п2н}}{s_{п2н} + s_{п2b}},$$

де x'_n – визначають по (40), а $s_{п2н}$ й $s_{п2b}$ – по (12) і (13).

Індуктивний опір ротора $x'_{2п}$, що входить в (59) і (60), повинне бути розраховане для пускового режиму з урахуванням витиснення струму (див. розд. 4).

Індуктивний опір короткого замикання при пуску ($s = 1$) з урахуванням витиснення струму й магнітного насичення приблизно можна визначити як

$$x'_{кп} = x_{\text{пост}} + k_x x_{3M};$$

при напівзакритих пазах на роторі $k_x = 0,825$, а при закритих – $k_x = 0,25$.

На круговій діаграмі із точки $O_{1п}$ проведемо ще одне півколо струму, що відповідає початковому пусковому режиму, діаметром, мм,

$$D_{1п} = \frac{U_{1НОМ} / x'_{кп}}{m_i}.$$

На перпендикулярі, відновленому в точці F , відкладемо відрізки, мм:

$$F F_m = r'_1 \frac{HF}{x'_{кп}}; \quad F F_{2п} = r'_{кп} \frac{HF}{x'_{кп}}.$$

Із точки H через точки F_m й $F_{2п}$ проведемо прямі $HT_{п}$ і $HK_{п}$, які являють собою лінії електромагнітної потужності (моменту) і корисної потужності для пускового режиму.

Кратність пускового моменту

$$\frac{M_{п}}{M_{НОМ}} = \frac{K_{п} G}{Dc};$$

Кратність пускового струму

$$\frac{I_{1п}}{I_{1НОМ}} = \frac{OK_{п}}{OD}.$$

Кратність пускового моменту у двигунів серії 4А лежить у межах: при $h = 50 \div 132$ мм $M_{п}/M_{НОМ} = 2,0 \div 2,2$; при $h = 160 \div 355$ мм $M_{п}/M_{НОМ} = 1,2 \div 1,4$.

Кратність пускового струму – порядку 4,5 ÷ 7,5, більше значення відповідає більшій потужності.

Початковий пусковий струм

$$I_{1п} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{r_{кп}^{/2} + x_{кп}^{/2}}}.$$

Початковий пусковий момент

$$M_{п} = \frac{p m_1 I_{1п}^2 r'_{2п}}{2\pi f_1}.$$

Критичне ковзання

$$s_{кр} = \frac{c_1 r'_2}{x_1 + c_1 x'_2}.$$

Перевантажувальна здатність двигуна

$$\frac{M_{max}}{M_{НОМ}} = \frac{(s_{НОМ}/s_{кр}) + (s_{кр} / s_{НОМ}) + R_{кр}}{2 + R_{кр}},$$

де

$$R_{кр} = 2r_1 s_{кр} / c_1 r'_2.$$

11. АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Розглянутий графічний метод визначення робочих характеристик по круговій діаграмі – наочний і зручний для аналізу отриманих результатів, але дає деяку погрішність, обумовлену графічними побудовами.

В основу аналітичного методу покладена схема заміщення з винесеним намагнічувальним контуром (див. рис. 15, б).

Ковзання при різних навантаженнях двигуна можна визначити по формулі

$$s = \frac{A - \sqrt{A^2 - c_1^2 r_2' B}}{B}.$$

Тут A и B – функції повної механічної потужності двигуна P_2' ;

$$A = \frac{m_1 U_{1\text{НОМ}}^2}{2P_2'} - r_1; \quad B = \frac{m_1 U_{1\text{НОМ}}}{P_2'} + R' = 2A + R',$$

де R' – розрахунковий опір, Ом,

$$R' = r_2' \left\{ \left[\frac{r_1}{r_2'} \left(1 + \frac{x_2'}{x_m} \right) \right]^2 + \left[\frac{x_1}{r_2'} + \left(1 + \frac{x_2'}{x_m} \right) + \frac{x_2'}{r_2'} \right]^2 \right\}.$$

Повна механічна потужність, Вт,

$$P_2' = P_2 + P_{\text{дод}} + P_{\text{мех}}.$$

Додаткові втрати визначають по (54) і (55), а механічні – по (52) або (53).

Еквівалентний опір робочого ланцюга схеми заміщення (див. рис. 15,б), по якій проходить струм $I_2'' = I_2' / c_1$,

$$z_{\text{екв}} = \sqrt{r_{\text{екв}}^2 + x_{\text{екв}}^2},$$

де

$$r_{\text{екв}} = c_1 r_1 + \frac{c_1^2 r_2'}{S}; \quad x_{\text{екв}} = c_1 x_1 + c_1^2 x_2'.$$

Наведений струм в обмотці ротора, А,

$$I_2' = c_1 I_2'',$$

де $I_2'' = U_{\text{НОМ}} / z_{\text{екв}}$ – струм робочого ланцюга схеми заміщення.

Коефіцієнт потужності в робочому ланцюзі схеми заміщення

$$\cos \phi_2' = \frac{r_{\text{екв}}}{z_{\text{екв}}}.$$

Активні й реактивна складові токи I_2' , А,

$$I_{2a}'' = I_2'' \cos \phi_2'; \quad I_{2p}'' = I_2'' \sin \phi_2'.$$

Активні й реактивна складові токи статора I_1 , А,

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}''; \quad I_{1p} = I_{0p} + I_{2p}'',$$

де I_{0a} й I_{0p} – активного й реактивна складового струму ідеального холостого ходу, А,

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ел0}} + P_{\text{М}}}{m_1 U_{\text{НОМ}}}; \quad I_{0p} \approx I_{\mu}.$$

Струм статора асинхронного двигуна, А,

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}.$$

Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна

$$\cos \phi_1 = I_{1a} / I_1.$$

Споживана двигуном потужність, кВт,

$$P_1 = m_1 U_{\text{НОМ}} I_{1a} \cdot 10^{-3}.$$

Частота обертання ротора, об/хв,

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

Електромагнітний момент, Н·м,

$$M = \frac{9,55 P_{\text{ем}} \cdot 10^3}{n_2},$$

де $P_{\text{ем}}$ – електромагнітна потужність [див. (51)].

Для розрахунку робочих характеристик двигуна задаються рядом відносних значень корисної потужності $P_{2*} = P_2 / P_{\text{НОМ}}$, наприклад: 0,25; 0,50;

0,75; 1,00; 1,25. Для кожного із цих значень розраховують необхідні параметри й заносять їх у табл. 15. Потім будують робочі характеристики двигуна.

Таблиця 15

Розрахункова формула	Значення параметрів при відносній потужності				
	P_{2*}				
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
$P_2 = P_{\text{НОМ}} P_{2*}, \text{ Вт}$ $P'_{\text{дод}} = P_{\text{дод}} P_{2*}^2, \text{ Вт}$ $P'_2 = P_2 + P'_{\text{дод}} + P_{\text{мех}}, \text{ Вт}$ $A = \frac{m_1 U_{1\text{НОМ}}^2}{2P'_2} - r_1$ $B = 2A + R'$ $s = \left[A - \sqrt{A^2 - c_1^2 r_2' B} \right] / B$ $r_{\text{екв}} = c_1 r_1 + c_1^2 r_2' / s, \text{ Ом}$ $x_{\text{екв}} = c_1 x_1 + c_1^2 x_2', \text{ Ом}$ $z_{\text{екв}} = \sqrt{r_{\text{екв}}^2 + x_{\text{екв}}^2}, \text{ Ом}$ $\cos \varphi_2' = \frac{r_{\text{екв}}}{z_{\text{екв}}}$ $I_2'' = U_{1\text{НОМ}} / z_{\text{екв}}, \text{ А}$ $I_{2a}'' = I_2'' \cos \varphi_2', \text{ А}$ $I_{2p}'' = I_2'' \sin \varphi_2', \text{ А}$ $I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'', \text{ А}$ $I_{1p} = I_{0p} + I_{2p}'', \text{ А}$ $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \text{ А}$ $\cos \varphi_1 = I_{1a} / I_1$					

$P_1 = m_1 U_{1\text{НОМ}} I_{1a}, \text{ ВТ}$ $\eta = P_1 / P_2$ $P_{\text{el}} = m_1 I_1^2 r_1, \text{ ВТ}$ $P_{\text{ем}} = P_1 - (P_{\text{el}} + P_{\text{м}}) \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$ $n_2 = n_1 (1 - s), \text{ об/хв}$ $M = 9,55 \cdot 10^3 \frac{P_{\text{ем}}}{n_2}, \text{ Н} \cdot \text{м}$					
---	--	--	--	--	--

12. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА

Перетворення енергії в електричних машинах супроводжується її втратами, що викликають нагрівання конструктивних елементів машини. Для забезпечення тривалого строку експлуатації температура окремих частин двигуна при роботі не повинна перевищувати припустимих меж, які визначаються класом нагрівостійкості ізоляції. Температура, до якої нагріваються ті або інші елементи машини, залежать від температури навколишнього (або охолодного) середовища. Її приймають вище на 40 °С. При тепловому розрахунку визначають перевищення температури різних частин двигуна над температурою охолодного середовища $\Delta\Theta$ в сталому тепловому режимі. Найбільше важливо при цьому визначити перевищення температури ізольованих обмоток, тому що надмірний їхній перегрів може викликати зниження електричної й механічної міцності ізоляції.

Гранично припустимі перевищення температур для обмоток машин змінного струму потужністю менш 5000 кВА відповідно до ДСТУ [2] становлять:

- для класу нагрівостійкості *B* 80 °С;
- для класу нагрівостійкості *F* 100 °С.

Наближену перевірку двигуна на нагрівання можна виконати за допомогою спрощеного методу теплового розрахунку, заснованого на використанні середніх значень коефіцієнтів тепловіддачі окремих елементів асинхронних двигунів.

Кінцевим результатом розрахунку є визначення середнього перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, (НС):

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_{1b} + \Delta\Theta_b, \quad (61)$$

де $\Delta\Theta_{1b}$ – середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря усередині машини; $\Delta\Theta_b$ – середнє перевищення температури повітря усередині машини над температурою навколишнього середовища (у припущенні, що температура корпусу дорівнює температурі повітря усередині машини), $^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок середнього перевищення температури

Перевищення температури $\Delta\Theta_{1b}$ розраховується по формулі

$$\Delta\Theta_{1b} = \frac{(\Delta\Theta_{\text{пов}1} + \Delta\Theta_{\text{із-п}1})l_1 + (\Delta\Theta_{\text{пов-л}1} + \Delta\Theta_{\text{із-л}1})l_{\text{л}1}}{l_1 + l_{\text{л}1}}.$$

Тут $\Delta\Theta_{\text{пов}1}$ – перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника над температурою повітря усередині машини, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\Theta_{\text{із-п}1}$ – перепад температури в пазовій ізоляції обмотки статора, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\Theta_{\text{пов-л}1}$ – перевищення температури поверхні лобових частин обмотки статора над температурою повітря усередині машини; $\Delta\Theta_{\text{із-л}1}$ – перепад температури в ізоляції лобових частин обмотки, $^{\circ}\text{C}$; l_1 і $l_{\text{л}1}$ – відповідно довжина пазової й лобової частин котушки, знаходять по (1), (2) і (15).

Складові перевищення температури $\Delta\Theta_{\text{пов}1}$, $\Delta\Theta_{\text{із-п}1}$, $\Delta\Theta_{\text{пов-л}1}$ і $\Delta\Theta_{\text{із-л}1}$ визначаються в такий спосіб:

$$1. \quad \Delta\Theta_{\text{пов1}} = k \frac{P_{\text{еп1}} + P_{\text{м1}}}{\pi D_1 l_1 \alpha_1} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (62)$$

Тут $P_{\text{еп1}} = k_p P_{\text{ел}} \left[l_1 / (l_1 + l_{\text{л1}}) \right]$ – електричні втрати в пазовій частині обмотки, Вт; k_p – коефіцієнт збільшення втрат для граничної температури відповідно до класу нагrevостойкости: для класу B $k_p = 1,15$; для класу F $k_p = 1,07$; $P_{\text{м1}}$ – магнітні втрати в сердечнику статора, Вт [див. (48)]; k – коефіцієнт, що враховує відвід частини тепла через зовнішню поверхню станини безпосередньо в навколишнє середовище, вибирається з табл. 16; $P_{\text{ел}}$ – електричні втрати в обмотці статора, Вт [див. (49)]; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої поверхні машини, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, знаходять по рис. 20, 21; D_1 – внутрішній діаметр статора, мм.

Таблиця 16

Виконання по способі захисту	Значення коефіцієнта k при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

$$2. \quad \Delta\Theta_{\text{із п1}} = \frac{P_{\text{еп1}}}{z_1 \Pi_{\text{п1}} l_1} \left(\frac{b_{\text{із1}}}{\lambda_{\text{із}}} + \frac{b_{\text{п1}} + b'_{\text{п1}}}{16\lambda'_{\text{із}}} \right).$$

Тут $\Pi_{\text{п1}}$ – периметр поперечного переріза умовної поверхні охолодження паза статора, мм; для трапецеїдального напівзакритого паза (див. рис. 4, а) $\Pi_{\text{п1}} = 2h_{\text{п1}} + b'_{\text{п1}} + b_{\text{п1}}$, для прямокутних пазів (див. рис. 4, б, в) $\Pi_{\text{п1}} = 2(h_{\text{п1}} + b_{\text{п1}})$; $b_{\text{із1}}$ – однобічна товщина ізоляції в пазу (див. [2]); $\lambda_{\text{із}}$ – середній коефіцієнт теплопровідності пазової ізоляції, для класів нагrevостойкости B й F $\lambda_{\text{із}} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мм})$; $\lambda'_{\text{із}}$ – середній коефіцієнт теплопровідності внутрішньої ізоляції всипної обмотки, $\lambda'_{\text{із}} = (1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мм})$ при відношенні діаметрів ізолювані й неізолювані

проведення $d / d_{i3} = 0,90 \div 0,95$; для проводів прямокутного перетину приймають

$$(b_{\text{пл}} + b'_{\text{пл}}) / 16\lambda'_{i3} = 0.$$

ІР23

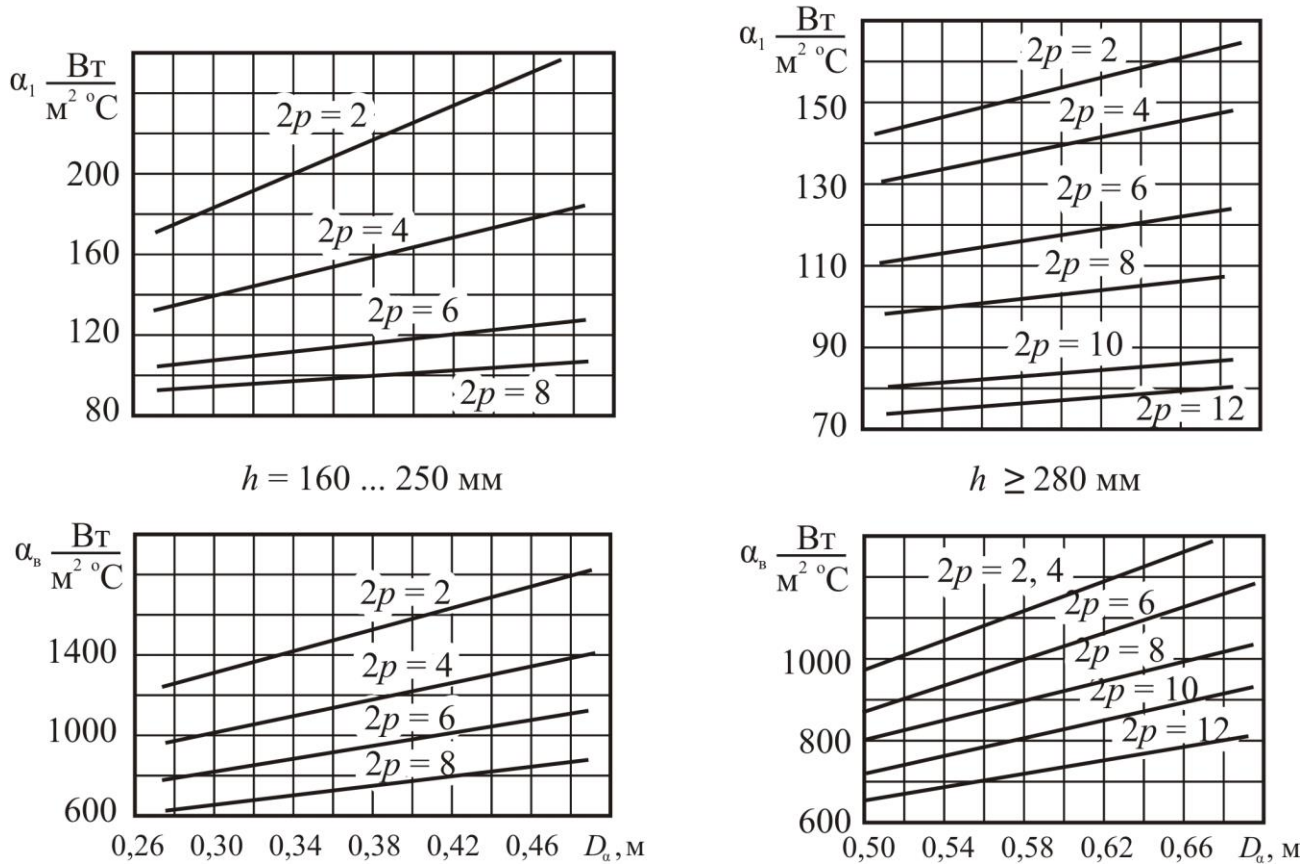


Рис. 20

3.
$$\Delta\Theta_{\text{пов.л1}} = \frac{kP_{\text{ем}}}{2\pi D_{l1} \alpha_1}.$$

Тут $P_{\text{е.м}} = k_p P_{\text{ел1}} / (l_1 + l_{\text{л1}})$; коефіцієнти k_p , k і α_1 ті ж, що й в (62); $l_{\text{в.1}}$ – довжина вильоту лобової частини обмотки статора, мм [див. (17), (18), (19)]; $l_{\text{л1}}$ – середня довжина однієї лобової частини котушки, мм [див. (15)].

4.
$$\Delta\theta_{i3, \text{л1}} = \frac{P_{\text{ел1}}}{2z_1 \Pi_{\text{л1}} l_{\text{л1}}} \left(\frac{b_{i3, \text{л1}}}{\lambda_{i3}} + \frac{h_{\text{пл}}}{12\lambda'_{i3}} \right).$$

Тут $\Pi_{\text{л1}}$ – периметр умовної поверхні охолодження лобової частини котушки, обмотки статора, приблизно $\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{пл}}$.

$b_{\text{із.л1}}$ – однобічна товщина ізоляції лобової частини обмотки, мм, якщо лобові частини неізольовані, те $b_{\text{із.л1}} = 0$; для статорів з відкритими й напіввідчиненими пазами для прямокутного проведення $\frac{h_{\text{п}}}{\lambda'_{\text{із}}} = 0$.

ІР44

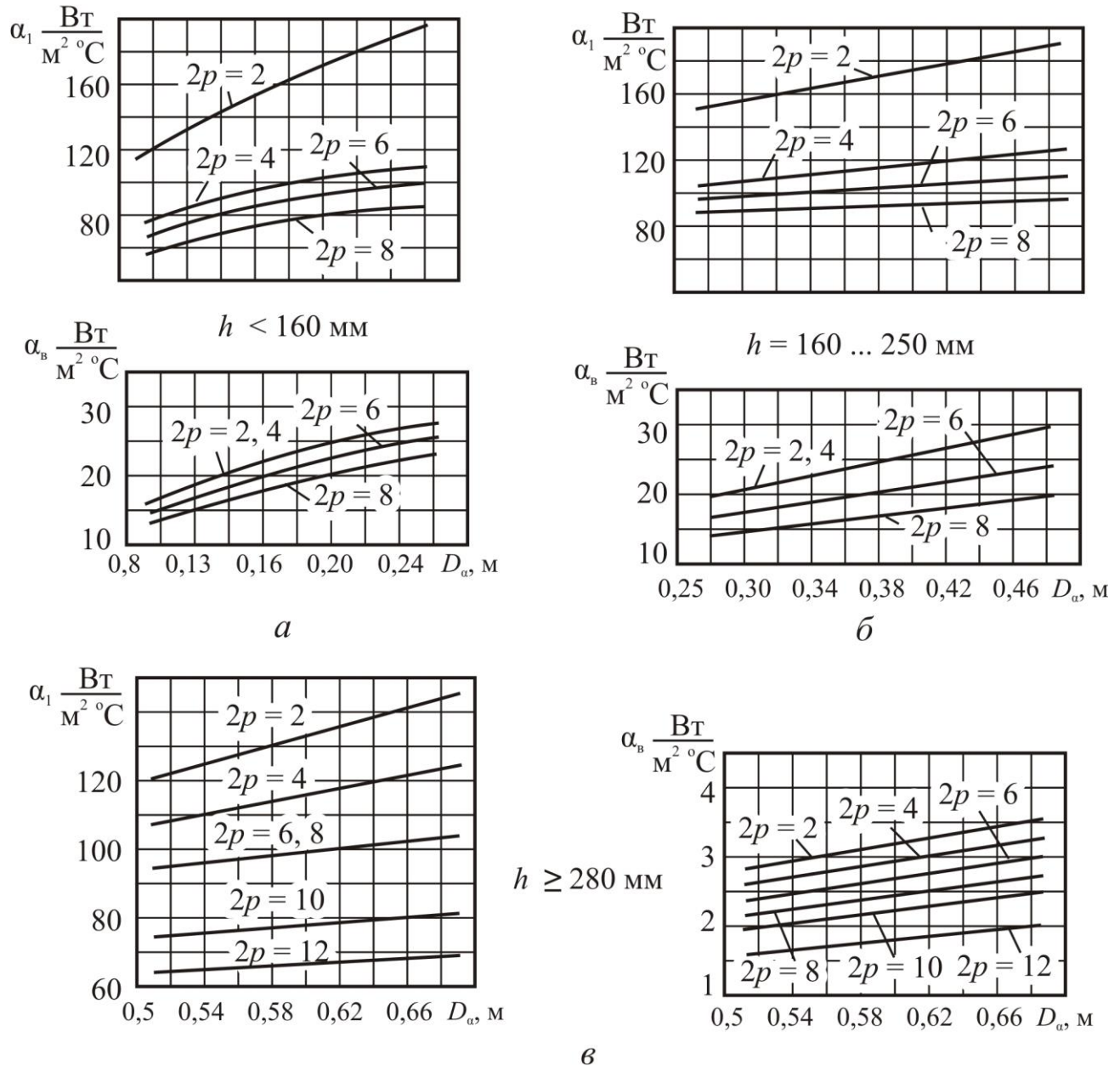


Рис. 21

Перевищення температури $\Delta\Theta_{\text{в}}$ визначають по формулі

$$\Delta\Theta_{\text{в}} = \frac{\sum P_{\text{в.вм}}}{S_{\text{оx}} \alpha_{\text{в}}},$$

де $\sum P_{\text{в.вм}}$ – сумарні втрати, що відводять у повітря усередині машин, Вт; для двигунів зі ступенем захисту IP23

$$\sum P_{\text{в.вм}} = \sum P' - (1-k)(P_{\text{е.л1}} + P_{\text{м1}});$$

для двигунів зі ступенем захисту IP44

$$\sum P_{\text{в.вм}} = \sum P' - (1-k)(P_{\text{е.л1}} + P_{\text{м1}}) - 0,9P_{\text{мех}}.$$

Тут $P_{\text{мех}}$ – механічні втрати [див. (52)];

$$\sum P' = \sum P - (k_p - 1)(P_{\text{ел}} + P_{\text{е2}});$$

$P_{\text{е.л1}}$ і $P_{\text{е.л2}}$ – електричні втрати в лобових і пазових частинах обмотки статора, Вт,

$$P_{\text{е.л1}} = k_p P_{\text{ел}} \frac{l_{\text{л1}}}{l_1 + l_{\text{л1}}}; \quad P_{\text{е.л2}} = k_p P_{\text{ел}} \frac{l_{\text{л2}}}{l_2 + l_{\text{л2}}};$$

$P_{\text{ел}}$ і $P_{\text{е2}}$ – електричні втрати відповідно в обмотці статора й ротора [див. (49) і (50)]; $\sum P$ – сумарні втрати у двигуни [див. (57)]; $\alpha_{\text{в}}$ – коефіцієнт підігріву

повітря усередині машини, $\text{Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мм}^2)$, знаходять по кривих рис. 20, 21; $S_{\text{ох}}$ –

умовна поверхня охолодження корпусу двигуна, мм^2 ; при ступені захисту IP23

$S_{\text{ох}} = \pi D_{\text{лн}}(l_1 + 2l_{\text{в1}})$, при ступені захисту IP44 $S_{\text{ох}} = (\pi D_{\text{лн}} + 8\Pi_p)(l_1 + 2l_{\text{в1}})$; Π_p –

розрахунковий периметр перетину ребер станини, мм, перебуває приблизно по

кривій рис. 22.

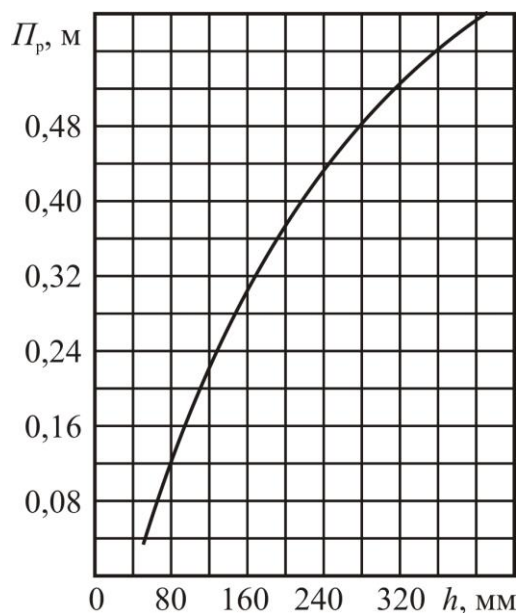


Рис. 22

Підставивши знайдені значення перевищень температур $\Delta\Theta_{1в}$ і $\Delta\Theta_{в}$ в (61), одержують підсумкову оцінку $\Delta\Theta_1$. Тому що її визначення носить наближений характер, то отримане значення повинне бути на 10–12% нижче припустимого перевищення температури для ізоляції обраного класу нагрівостійкості:

$$\Delta\Theta_1 \leq 0,9\Delta\Theta_{из.доп}.$$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Буняк О. А., Сисак І. М., Бабюк С. М. Електричні машини : навчальний посібник. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 324 с.
2. Гайденко Ю. А. Електричні машини : курс лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.
3. Advances in the field of electrical machines and drives / ed. by A. Karlis. MDPI, 2022. 254 p.
4. Alipranti D., Wasynczuk O. Electric machines theory and analysis using the finite element method. Cambridge University press, 2022. 514 p.
5. Rahmani-Andebili M. AC electric machines. Springer Cham, 2023. 104 p.
6. The study of emerging electrical machine technologies and their applications / ed. by R.-J. Wang, M. J. Kamper. MDPI, 2023. 250 p.

Навчальне видання

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні рекомендації

Укладачі: **Ставинський** Ростислав Андрійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 4,9.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

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

Свідотство субекта видавничої справи ДК № 4490 від 09.06.2013 р.