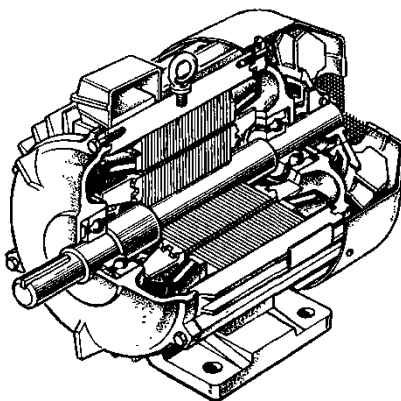


Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет
автоматики, енергетики

Кафедра електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН
методичні вказівки до виконання курсового проекту
для студентів III курсу денної та заочної форм навчання
спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"



Кропивницький
2019

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет
автоматики, енергетики

Кафедра електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН
методичні вказівки до виконання курсового проекту
для студентів III курсу денної та заочної форм навчання
спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Затверджено
на засіданні кафедри
електротехнічних систем та
енергетичного менеджменту
Протокол №10 від 25.02.2019 р.

Кропивницький
2019

Електричні машини. Проектування асинхронних машин: метод. вказівки до виконання курсового проекту з навч. дисц. «Електричні машини» для студ. 3 курсу ден. та заочн. форм навч. спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / [уклад.: П.Г. Плешков, Н.Ю. Гарасьова, О.А. Козловський], Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – 125 с.

Укладачі: канд. техн. наук, проф. П.Г. Плешков
канд. техн. наук, доц. Н.Ю. Гарасьова
канд. техн. наук, ст.викладач О.А. Козловський

Рецензент: докт. техн. наук, проф. С.І. Осадчий

© Плешков П.Г., Гарасьова Н.Ю.,
Козловський О.А., 2019
© Центральноукраїнський
національний технічний університет,
2019

Зміст

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ.....	6
1. ВИБІР ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ.....	8
2. РОЗРАХУНОК СТАТОРА.....	13
2.1. Визначення Z_1, w_1 і перерізу проводу обмотки статора.....	13
2.2. Розрахунок розмірів зубцевої зони статора.....	19
3. ВИБІР ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ.....	28
4. РОЗРАХУНОК РОТОРУ.....	29
4.1. Розрахунок короткозамкнутого ротора.....	29
4.2. Розрахунок осердя ротора.....	39
5. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА.....	41
5.1. Магнітна напруга повітряного зазору.....	41
5.2. Магнітна напруга зубцевої зони статора.....	41
5.3. Магнітна напруга зубцевої зони ротора.....	43
5.4. Магнітні напруги ярм статора і ротора. Намагнічуючий струм.....	47
6. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО РЕЖИМУ.....	50
6.1. Активні опори обмоток статора і фазного ротора.....	50
6.2. Активний опір фази короткозамкнутого ротора.....	54
6.3. Індуктивний опір розсіяння обмотки статора.....	55
6.4. Індуктивний опір обмотки короткозамкнутого ротора.....	58
6.5. Відносні значення параметрів.....	61
7. РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ.....	63
8. РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	70
9. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	76
9.1. Розрахунок струмів із врахуванням впливу зміни	

параметрів під впливом ефекту витіснення струму.....	77
9.2. Розрахунок струмів і моменту у пусковому режимі АД	
із врахуванням впливу ефекту витіснення струму і	
насичення від полів розсіювання.....	83
10. ТЕПЛОВИЙ ТА ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ.....	90
Додаток А. Приклад титульного аркуша.....	99
Додаток Б. Приклад завдання на курсовий проект.....	100
Додаток В. Загальні види асинхронного двигуна.....	104
Додаток Г. Ізоляція обмоток статорів асинхронних двигунів.....	107
Додаток Д. Каталожні дання обмоточних проводів.....	114
Додаток Е. Допустимі значення індукції магнітного ланцюга.....	121
Додаток Ж. Криві намагнічування для ярма та зубців АД.....	123
Додаток З. Криві намагнічування для зубцевих зон з врахуванням	
відгалуження потоку в паз.....	125
Література.....	126

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Згідно з робочою навчальною програмою з курсу «Електричні машини» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» для блоків вибіркових дисциплін «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» денної та заочної форм навчання виконується курсовий проект (КП) в 6 семестрі.

Метою курсового проекту є поширення та закріплення теоретичних знань по дисципліні, а також вивчення сучасних методів розрахунку та проектування електричних машин.

В даних методичних вказівках розглядається розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

В процесі проектування студент вирішує задачі вибору та розрахунку розмірів статора та ротора, електромагнітного розрахунку, розрахунку робочих та пускових характеристик, теплового та вентиляційного розрахунків, розробки конструкції машини.

З метою закріплення навичок використання обчислювальної техніки передбачено виконання розрахунків робочих та пускових характеристик двигуна за допомогою ПЕОМ.

КП складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини (можливе оформлення презентаційних матеріалів).

Розрахунково-пояснювальна записка складається з наступних розділів:

1. Вибір базової конструкції, головних розмірів.
2. Проектування статора.
3. Проектування ротора.
4. Розрахунок магнітного ланцюга та намагнічуючого струму.
5. Розрахунок параметрів двигуна для робочого режиму.
6. Розрахунок втрат потужності та ККД.
7. Розрахунок робочих та пускових характеристик.
8. Тепловий розрахунок двигуна та розрахунок вентиляції.
9. Спеціальний розділ курсового проекту.

Спеціальний розділ має науково-дослідний характер та потребує поглибленого вивчення спеціальної літератури по даному предмету.

Розрахунково-пояснювальна записка (РПЗ) до КП виконується на листах формату А4 рукописно або друкується на комп'ютері (по узгодженню з викладачем). Об'єм записки – до 50 сторінок формату А4.

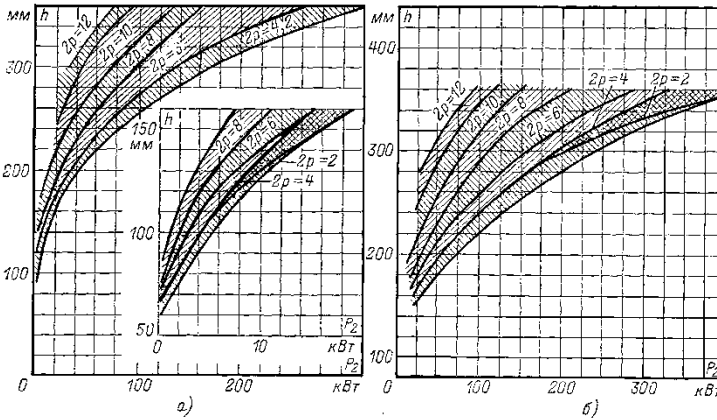
РПЗ обов'язково повинна вмішувати: титульний лист, завдання на виконання курсового проекту, зміст проекту, вступ, основну частину, висновки, літературу, специфікацію. Приклади виконання титульного листа та завдання на виконання курсового проекту наведені в додатках А та Б.

Графічна частина КП розміщується на двох листах формату А1 і включає в себе: загальний вигляд спроектованого асинхронного двигуна в двох проекціях; розгорнуту схему обмотки статора. Можливе виконання графічної частини у вигляді презентації, на листах формату А4. Графічна частина та РПЗ повинні відповідати вимогам ЄСКД.

Виконаний КП захищається студентом в кінці семестру (після попередньої перевірки викладачем).

1. ВИБІР ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

Розрахунок асинхронних машин починають з визначення головних розмірів: внутрішнього та зовнішнього діаметрів статора D і D_a ; розрахункової довжини магнітопроводу l_δ , висоти осі оберту h та зовнішньої поділки τ . Вибір головних розмірів проводять у наступній послідовності. Попередньо визначають висоту осі обертання по рис.1.1, а) чи б) для заданих P_2 та $2p$ в залежності від виконання двигуна. З ряду висот осей обертання (таблиця 1.1) вибирають найближче менше стандартне значення h .



Внутрішній діаметр D наближено може бути визначений за формулою:

$$D = K_D \cdot D_a \quad (1.1)$$

Значення K_D наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Відношення $K_D = D / D_a$ в двигунах серії 4А
при різних числах полюсів

$2p$	2	4	6	8
K_D	0,52-0,6	0,62-0,68	0,70-0,72	0,72-0,75

Далі знаходять полюсну поділку τ , м.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}, \quad (1.2)$$

та розрахункову потужність P' , кВт,

$$P' = P_2 \cdot \frac{\kappa_E}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (1.3)$$

де P_2 – потужність на валу двигуна, Вт;

κ_E - відношення ЕРС обмотки статора до номінальної
напруги, яке може бути визначене по рис.1.2.

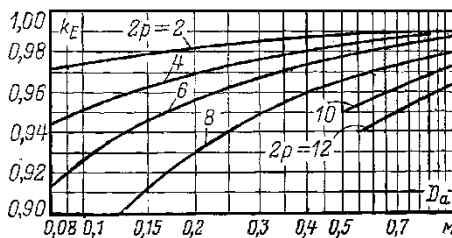


Рис. 1.2. Значення коефіцієнта κ_E .

Наближено значення η та $\cos \varphi$ можуть бути взяті з кривих на рис. 1.3
а) та б).

Визначають розрахункову довжину повітряного зазору:

$$\ell_\delta = \frac{P'}{D^2 \cdot \Omega \cdot \kappa_B \cdot \kappa_{o\delta 1} \cdot A \cdot B_\delta}, \quad (1.4)$$

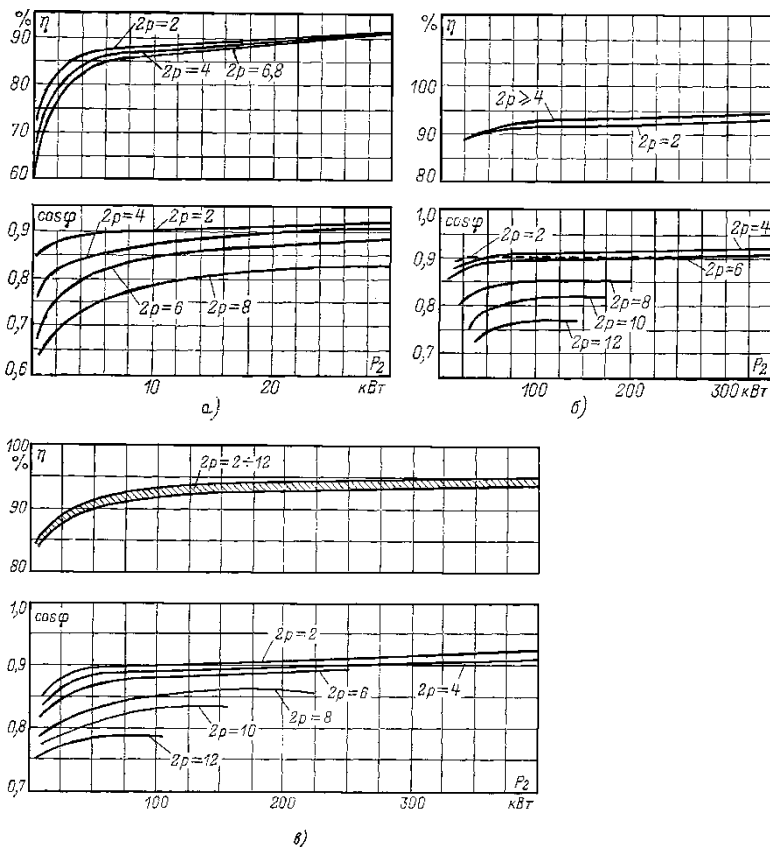


Рис.1.3. Наближені значення ККД і $\cos \varphi$ асинхронних двигунів:

- а) зі ступенем захисту IP44 і потужністю до 30 кВт;
- б) зі ступенем захисту IP44 і потужністю до 400 кВт;
- в) зі ступенем захисту IP23.

де Ω - синхронна кутова швидкість вала двигуна, рад/с, визначається за формулою:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p}, \quad (1.5)$$

де n_1 - синхронна частота обертання, об/хв;

f_1 - частота живлення, Гц.

K_B – коефіцієнт форми поля, визначається за формулою:

$$K_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11; \quad (1.6)$$

$\kappa_{o\delta 1}$ – попереднє значення обмоточного коефіцієнту, що вибирається в залежності від типу обмотки статора. Для одношарових обмоток приймають $\kappa_{o\delta 1}=0,95-0,96$. Для двошарових та одно-двошарових обмоток при $2p=2$ приймають $\kappa_{o\delta 1}=0,90-0,91$ та при більшій полюсності $\kappa_{o\delta 1}=0,91-0,92$.

A та B_δ - електромагнітні навантаження асинхронних двигунів, які вибирають по рис.1.4 та рис. 1.5 .

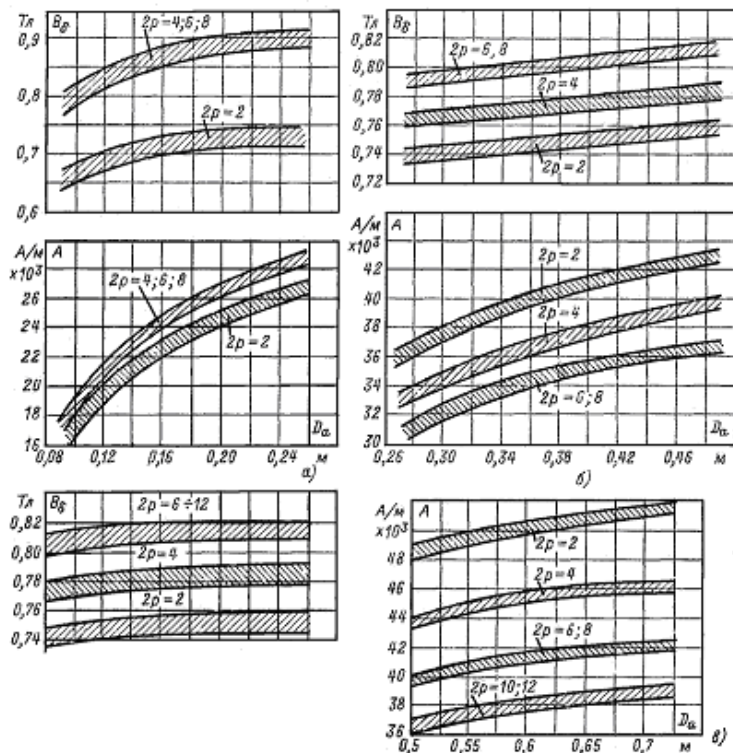


Рис.1.4. Електромагнітні навантаження асинхронних двигунів зі ступенем захисту IP44 при висоті осі обертання:

а) $h \leq 132$ мм; б) $h = 160 \dots 250$ мм; в) $h \geq 280$ мм

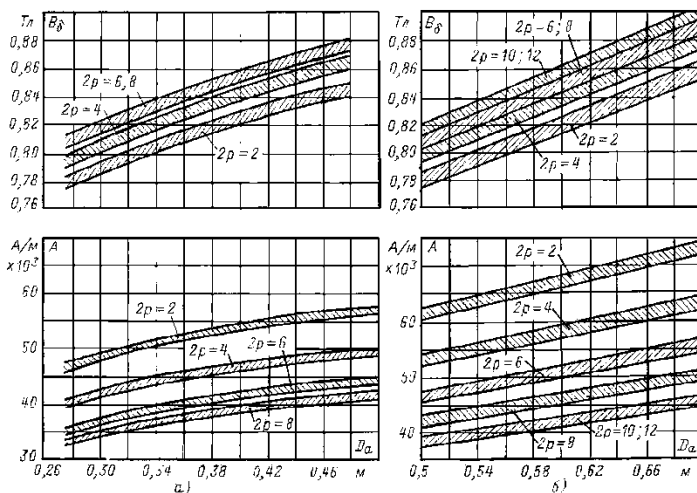


Рис.1.5. Електромагнітні навантаження асинхронних двигунів зі ступенем захисту IP23 при висоті осі обертання:
а) $h=160...250$ мм; б) $h \geq 280$ мм

Критерієм вірності вибору головних розмірів D та l_δ служить відношення $\lambda = \frac{\ell_\delta}{\tau}$, яке повинно знаходитись у межах, що вказані на рис. 1.6 для прийнятого виконання машини. Якщо λ буде надто великим, слід повторити розрахунок для ближчої з стандартного ряду більшої висоти осі обертання. Якщо λ буде надто мале, розрахунок повторюють для наступної в стандартному ряду меншої висоти осі обертання.

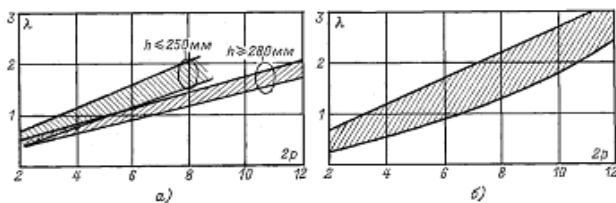


Рис.1.6. Відношення $\lambda = \frac{\ell_\delta}{\tau}$ для двигунів зі ступенем захисту:
а) IP44 ; б) IP23

2. РОЗРАХУНОК СТАТОРА

2.1. Визначення Z_1, w_1 і перерізу проводу обмотки статора

Спочатку необхідно визначити число пазів Z_1 та число витків в фазі обмотки статора w_1 . Для цього попередньо вибирають зубцеву поділку t_1 в залежності від типу обмотки, номінальної напруги та полюсної поділки машини.

Значення t_1 асинхронних двигунів серії 4А з всипною обмоткою показані на рис. 2.1, на якому зона 1 визначає можливі значення t_1 для невеликих двигунів з висотою осі обертання $h \leq 90$ мм; зона 2 визначає значення t_1 для більш потужних машин ($90 < h \leq 250$ мм); зона 3 визначає значення t_1 багатополюсних двигунів з $h \geq 280$ мм, що виконані з всипною обмоткою.

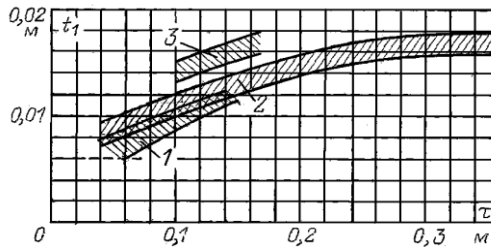


Рис.2.1. Зубцеві поділки статорів асинхронних двигунів з всипною обмоткою.

Для машин з напівжорсткою обмоткою з прямокутного проводу при $U_n \leq 660$ В та в високовольтних машинах t_1 залежить від потужності і номінальної напруги та може бути взято по табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Зубцеві поділки статорів асинхронних двигунів при прямокутних пазах.

Полюсна поділка τ , м	Напруга, В		
	до 660	3000	6000
Менше 0,15	0,016-0,02	0,022-0,025	0,024-0,03
0,15-0,4	0,017-0,022	0,024-0,027	0,026-0,034
Більше 0,4	0,02-0,028	0,026-0,032	0,028-0,038

Вибирають діапазон можливих значень t_l у межах вказаних значень зубцевих поділок $t_{lmin} - t_{lmax}$. Тоді можливі числа пазів статора відповідають вибраному діапазон

$$Z_{lmin} \dots Z_{lmax} = \frac{\pi \cdot D}{t_{lmax}} \dots \frac{\pi \cdot D}{t_{lmin}} \quad (2.1)$$

Кінцеве число пазів статора Z_l слід обирати в отриманому діапазоні, з врахуванням умов, які пов'язані з симетрією обмотки, і бажаним для проектуємої машини значенням пазів на полюс і фазу q_1 . Число пазів статора влюбій обмотці асинхронної машини повино бути кратним числу фаз, а число q_1 бажано мати цілим. Доцільно користуватися числом пазів статора, що приведені в таблиці 2.2.

Розраховуємо значення числа пазів на полюс та фазу q_1 .

$$q_1 = \frac{Z_l}{2 \cdot p \cdot m} \quad (2.2)$$

$m=3$ – число фаз статора.

В більшості асинхронних машин число q_1 бажано мати цілим.

Зубцева поділка статора (остаточно):

$$t_l = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q_1} \quad (2.3)$$

Кінцеве значення t_l не повино виходити за визначені межі більше, ніж на 10 % і для двигунів з $h \geq 56$ мм не повинно бути менше 6-7 мм.

При визначенні числа ефективних провідників в пазу u_n приймають до уваги наступне: u_n повино бути цілим, а в двошаровій обмотці бажано, щоб воно було кратне двом. Тому отримані в розрахунках числа u_n потрібно округляти до найближчого цілого або кратного числа. Щоб не допускати великої похибки при округленні, спочатку визначають попередньо число ефективних провідників в пазу u'_n при умові, що паралельні гілки в обмотці відсутні ($a=1$):

$$u'_n = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{ln} Z_l}, \quad (2.4)$$

де A – прийняте раніше значення лінійного навантаження;

I_{In} - номінальний струм обмотки статора:

Таблиця 2.2. Рекомендовані числа пазів короткозамкнутих асинхронних двигунів.

2р	Число пазів статора	Число пазів ротора	
		Пази без скосу	Пази зі скосом
2	24	15*,(16*),17*,19,32	18,20,26,31,33,34,35
	30	22,38	(18),20,21,23,24,37,39,40
	36	26,28,44,46	25,27,29,43,45,47
	42	32,33,34,50,52	-
	48	38,40,56,58	37,39,41,55,57,59
4	24	15*,16*,17,(32)	16,18,(20),30,33,34,35,36
	36	26,44,46	(24),27,28,30,(32),34,45,48
	42	(34),(50),52,54	(33),34,(38),(51),53
	48	34,38,56,58,62,64	(36),(38),(39),40,(44),57,59
	60	50,52,68,70,74	48,49,51,56,64,69,71
	72	62,64,80,82,86	61,63,68,76,81,83
6	36	26,46,(48)	28*,33,47,49,50
	54	44,64,66,68	42,43,51,65,67
	72	56,58,62,82,84,86,88	57,59,60,61,83,85,87,90
	90	74,76,78,80,100,102,104	75,77,79,101,103,105
8	48	(34),36,44,62,64	35,44,61,63,65
	72	56,58,86,88,90	56,57,59,85,87,89
	84	66,(68),70,98,100,102,104	(68),(69),(71),(97),(99),(101)
	96	78,82,110,112,114	79,80,81,83,109,111,113
10	60	44,46,74,76	57,69,77,78,79
	90	68,72,74,76,104,106,108,110,112,114	70,71,73,87,93,107,109
	120	86,88,92,94,96,98,102,104,106,134,136,138,140,142,144,146	99,101,103,117,123,137,139
12	72	56,64,80,88	69,75,80,89,91,92
	90	68,70,74,88,98,106,108,110	(71),(73),86,87,93,94,(107),(109)
	108	86,88,92,100,116,124,128,130,132	84,89,91,104,105,111,112,125,127
	144	124,128,136,152,160,164,166,168,170,172	125,127,141,147,161,163

Примітка: 1. В дужках вказані числа пазів, при яких можливо підвищення вібрації двигунів.

2. Зірочкою відмічені числа пазів, що застосовуються, переважно, в машинах малої потужності.

$$I_{1n} = \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (2.5)$$

Отримане по (2.4) значення u'_n не округляють до цілого, а знаходять таке число паралельних гілок обмотки a , при якому число ефективних провідників в пазу буде задовольняти всім умовам, або потребує лише незначної зміни:

$$u_n = a \cdot u'_n \quad (2.6)$$

Число a при цьому, може бути взято тільки з ряду можливих чисел гілок для обмотки даного типу і заданного числа полюсів. Отримане по (2.6) число u_n округляють до найближчого цілого або кратного, в залежності від типу обмотки. Прийняте на данному етапі розрахунку число паралельних гілок a , далі при виборі розмірів та числа елементарних провідників може бути змінено. В цьому випадку пропорційно змінюється також значення u_n .
Остаточне значення числа витків в фазі обмотки:

$$w_1 = \frac{u_n Z_1}{2 \cdot a \cdot m} \quad (2.7)$$

Остаточне значення лінійного навантаження:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1n} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} \quad (2.8)$$

Отримане значення A потрібно порівняти з рекомендованим, воно повинно лише незначно відрізнятись від прийнятого.

Схему обмотки статора вибирають в залежності від потужності машини та, орієнтуючись на конструкцію та бажану технологію укладки обмотки в пази. Машини потужністю до 15 кВт в більшості випадків мають одношарову концентричну обмотку. В машинах більшої потужності всіпні обмотки виконуються двошаровими, а при механізованій укладці застосовують однодвошарові або двошарові концентричні обмотки. Всі обмотки із прямокутного проводу виконуються тільки двошаровими.

Обмоточний коефіцієнт:

$$\kappa_{o\partial l} = \kappa_{ск} \cdot \kappa_p \quad (2.9)$$

Для одношарових обмоток $\kappa_{ск}$ завжди дорівнює одиниці. Для двошарових обмоток розраховується по (2.9).

Коефіцієнт скорочення для першої гармоніки:

$$\kappa_{ск} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.10)$$

де β – розрахункове скорочення;

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} \quad (2.11)$$

В двошарових обмотках асинхронних двигунів крок виконують у більшості випадків із скороченням, близьким до $\beta = 0,8$.

Коефіцієнт розподілення для першої гармоніки:

$$\kappa_p = \frac{\sin\left(q_1 \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (2.12)$$

$$\text{де} \quad \alpha = 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{Z_1}; \quad (2.13)$$

Значення κ_p можна визначити по таблиці 3.3 для першої гармоніки.

Таблиця 2.3. Значення коефіцієнту розподілення κ_p .

q	2	3	4	5	6	∞
$\gamma=1$	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,955

Після розрахунку $\kappa_{o\partial l}$ уточнюємо значення магнітного потоку Φ :

$$\Phi = \frac{\kappa_E \cdot U_{1n}}{4,44 \cdot w_1 \cdot \kappa_{o\partial l} \cdot f_1} \quad (2.14)$$

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot \ell_\delta} \quad (2.15)$$

Якщо отримане значення B_δ виходить за рекомендовані межі більш, ніж на 5 %, слід прийняти друге значення числа u_n і повторити розрахунки.

Переріз ефективних провідників визначають, виходячи з струму в одній паралельній гілці та допустимій щільності струму в обмотці:

$$q_{\text{эф1}} = \frac{I_{1n}}{a \cdot j_1} \quad (2.16)$$

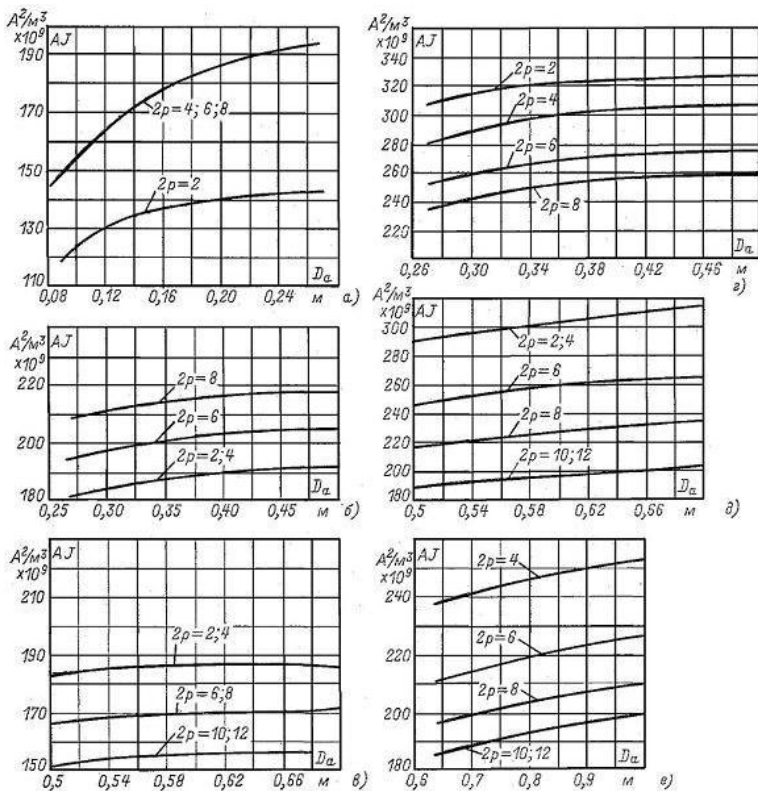


Рис.2.2. Середні значення AJ для асинхронних двигунів:

- а) – з ступенем захисту IP44, $h \leq 132$ мм;
- б) – з ступенем захисту IP44, $h = 160-250$ мм;
- в) – з ступенем захисту IP44, $h = 280-355$ мм;
- г) – з ступенем захисту IP23, $h = 160-250$ мм;
- д) – з ступенем захисту IP23, $h = 280-355$ мм;
- е) – з ступенем захисту IP23 при $U=6000$ В.

Вибір допустимої щільності струму виконують з врахуванням лінійного навантаження двигуна:

$$j_1 = \frac{(A \cdot J)}{A} \quad (2.17)$$

Значення (AJ) для асинхронних двигунів різного виконання і потужності приведені на рис. 2.2. В обмотках, що призначені для механізованої укладки, діаметр ізолюваного проводу звичайно вибирають не більше 1,4 мм, а при ручній укладці (двигуни з $h > 160$ мм) – не більше 1,7 мм. Якщо розрахунковий переріз ефективного провідника в машинах із всипною обмоткою вище цих значень, то ефективний провідник ділиться на декілька елементарних. Для цього по таблиці додатку Д1 підбирається переріз q_{el} і число елементарних провідників n_{el} , що складають один ефективний, таким чином, щоб діаметр d_{el} елементарних провідників не виходив за вказані межі, а їх сумарна площа перерізу була близька до розрахункового перерізу ефективного провідника:

$$q_{el} \cdot n_{el} = q_{ef} \quad (2.18)$$

При проектуванні машин з обмоткою із прямокутного проводу переріз кожного провідника не повинен перевищувати 17-20 мм², тому, що в цьому випадку збільшуються втрати на віхрові струми. Якщо розрахункове значення $q_{ef} > 20$ мм², то прямокутні провідники підрозділяють на елементарні так, щоб $q_{el} \leq 17-20$ мм². (Додатки Д2-Д7)

Після кінцевого вибору q_{el} , n_{el} та a слід уточнити щільність струму в обмотці, яка може трохи змінитися, порівняно з попередньо прийнятою, при виборі перетинів елементарних провідників:

$$J = \frac{I_{1n}}{a \cdot q_{el} \cdot n_{el}} \quad (2.19)$$

2.2. Розрахунок розмірів зубцевої зони статора

Конфігурація пазів та зубців двигуна визначається потужністю машини та типом обмотки. Розрахунок розмірів зубцевої зони проводять по допустимим

індукціям в ярмі та в зубцях статора, які приведені в таблицях додатків Е1 та Е2.

Обмотка з прямокутного проводу вкладається в пази з паралельними стінками (рис.2.3, (а) та рис.2.3, (б)). Зубці в таких пазах мають трапецеїдальний переріз і індукція в них нерівномірна. Звичайно задаються значеннями допустимої індукції в ярмі статора B_a і індукцією $B_{z\max}$ в найбільш вузькому перерізі $b_{z\min}$, або індукцією $B_{z1/3}$ в перерізі зубця з шириною $b_{z1/3}$, взятому на відстані, що дорівнює 1/3 його висоти від найбільш вузької частини зубця.

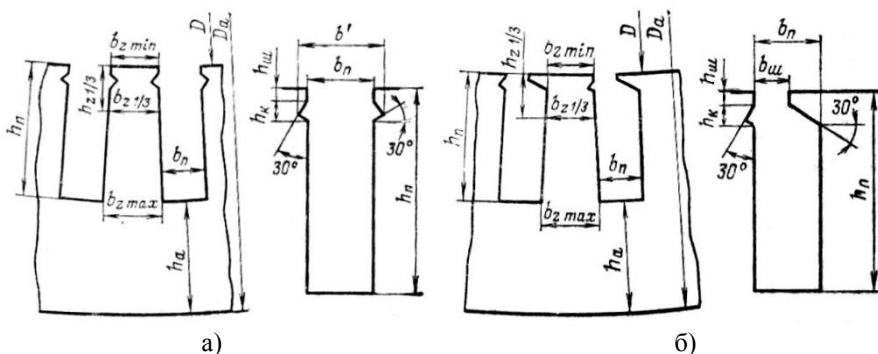


Рис. 2.3. До розрахунку відкритих (а) та напіввідкритих (б) пазів статора.

За вибраними значеннями індукцій визначають:

- висоту ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot \kappa_c} \quad (2.20)$$

- мінімальну ширину зубця:

$$b_{z1\min} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot \ell_\delta}{B_{z1\max} \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot \kappa_c} \quad (2.21)$$

- або ширину зубця на відстані 1/3 його висоти від найбільш вузької частини:

$$b_{z1/3} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot \ell_\delta}{B_{z1/3} \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot \kappa_c} \quad (2.22)$$

Значення коефіцієнтів заповнення осердя сталлю визначаємо по табл.2.5.

Таблиця 2.4. Рекомендовані значення коефіцієнта заповнення сталлю
магнітопроводів статора та ротора асинхронних двигунів

h , мм	U , В	Марка сталі	Статор		Короткозамкнутий ротор	
			Спосіб ізолювання листів	K_c	Спосіб ізолювання листів	K_c
50-250	≤ 660	2013	Окисидування	0,97	Окисидування	0,97
280-355	≤ 660	2312	Лакування	0,95	Окисидна плівка	0,95

Для АД з фазним ротором $K_c = 0,95$.

Розміри пазу спочатку визначають без врахування розмірів і числа провідників обмотки, виходячи тільки з допустимих значень індукцій

- висота пазу:

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a ; \quad (2.23)$$

- ширина пазу:

$$b_n = t_1 - b_{z \min} \quad (2.24)$$

$$\text{або} \quad b_n = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_n / 3)}{z_1} \cdot b_{z1/3} \quad (2.25)$$

$$\text{Звичайно } b_n \approx (0,4 - 0,5) \cdot t_1 \quad (2.26)$$

Попередньо визначена ширина паза b_n використовується для вибору розмірів обмоточного проводу. Ширина провідника b повинна бути меншою ширини паза на товщу всієї ізоляції з врахуванням допусків, тобто корпусної, виткової і провідникової ($2b_{i3}$), а також припусків на збірку осердя (Δb_n):

$$b = b_n - \Delta'_{i3}, \quad (2.27)$$

$$\text{де} \quad \Delta'_{i3} = 2 \cdot b_{i3} + \Delta b_n. \quad (2.28)$$

Значення товщини ізоляції вибирається по таблицям додатку Г. Якщо ефективний провідник обмотки складається з двох елементарних провідників, то ширина кожного з них:

$$b = 0,5 \cdot (b_n - \Delta'_{i3}) \quad (2.29)$$

Значення, що визначенні по (2.27) і (2.29) є попередніми. Остаточна ширина провідника знаходиться по таблиці стандартних розмірів обмоточних проводів (додаток Д2-Д7). З цієї таблиці по попередньо розрахованій ширині

провідника і по його розрахунковому перерізу підбирають найбільш близькі до них стандартні значення q_{el} та b і відповідну їм висоту провідника a . Висота провідника при цьому не повинна перевищувати 2,5-3,0 мм, так як при більшій висоті в провідниках, що знаходяться один на одному в одному пазу, починає проявлятися ефект витіснення струму. Надто мала висота провідників ($a < 1$ мм) викликає значні труднощі при виготовленні катушок. Небажане також застосування прямокутних проводів з близькими розмірами a та b . Звичайно використовують провода з відношенням $b : a$, близьким 2:1.

Після уточнення розмірів провідників складається специфікація паза (таблиця заповнення паза), де вказуються розміри провідників, назви, розміри та кількість шарів ізоляційних матеріалів, різних прокладок і т.і.

Сума розмірів по висоті та ширині паза всіх провідників і ізоляції, з врахуванням необхідних допусків на розбухання ізоляції і на укладку обмотки, визначає розміри частини паза, що зайнята обмоткою.

В бокових стінках верхньої частини відкритих пазів виконують виємки для кріплення пазових клинів. Глибина виємки під клин в асинхронних двигунах загального призначення в машинах середньої потужності $b' - b_n = 2-5$ мм, $h_{ш} = 0,5-1,0$ мм і $h_{к} = 3-3,5$ мм і досягає 5 мм в потужних машинах.

Отримані при розрахунках розміри є розмірами паза "в світу". Дійсні розміри паза в штампі будуть декілька більшими на припуски на збірку (табл.2.5).

Таблиця 2.5. Припуски по ширині та висоті пазу

h , мм	Припуски, мм	
	По ширині пазу Δb_n	По висоті пазу Δh_n
50-132	0,1	0,1
160-250	0,2	0,2
280-355	0,3	0,3

Тоді розміри паза в штампі наступні:

$$b_n = b'_n + \Delta b_n \quad (2.30)$$

$$h_n = h'_n + \Delta h_n \quad (2.31)$$

Після того, як всі розміри паза в штампі встановлені, визначають ширину зубців по таблиці 2.6.

Обмотку з підрозділених катушок в машинах з номінальною напругою $U_n \leq 660$ В укладають в напіввідкриті пази (рис. 2.3,б). Ширина шліца паза $b_{ш}$ вибирається з умови забезпечення легкої укладки напівкатушок в паз, тому $b_{ш} = 0,5 \cdot b_n + (1,0 - 1,5)$ мм. Висоту шліца і висоту клинової частини паза виконують у межах $h_{ш} = 0,6 - 0,8$ мм і $h_k = 2,5 - 3,5$ мм (більші значення беруться при широких пазах і більшій потужності двигунів).

Таблиця 2.6. Розрахункові розміри трапецеїдальних зубців статора при відкритих та напіввідкритих пазах

Розмір	Паз по рис. 2.3, а)	Паз по рис. 2.3, б)
$b_{z \min}$	$\frac{\pi \cdot D}{Z_1} - b_n$	$\frac{\pi \cdot D + 2 \cdot (h_{ш} + h_k)}{Z_1} - b_n$
$b_{z \max}$	$\pi \cdot \frac{D + 2 \cdot h_n}{Z_1} - b_n$	$\pi \cdot \frac{D + 2 \cdot h_n}{Z_1} - b_n$
$b_{z1/3}$	$\pi \cdot \frac{D + \frac{2}{3} \cdot h_n}{Z_1} - b_n$	$\pi \cdot \frac{D + \frac{2}{3} \cdot h_n}{Z_1} - b_n$
h_z	h_n	h_n

Вибір розмірів провідників, розрахунок заповнення пазу і визначення його розмірів "в світу" і в штампі виконують так само, як і для відкритих пазів. Ширину і розрахункову висоту визначають за формулами, що приведені в таблиці 2.7.

Круглі обмоточні проводи всипної обмотки можуть бути укладені в пази довільної конфігурації, тому розміри зубцевої зони при всипних обмотках вибирають таким чином, щоб паралельні грані мали зубці, а не пази статора. Конфігурації пазів статора для укладки обмотки з круглого проводу приведені на рис. 2.4, а-в.

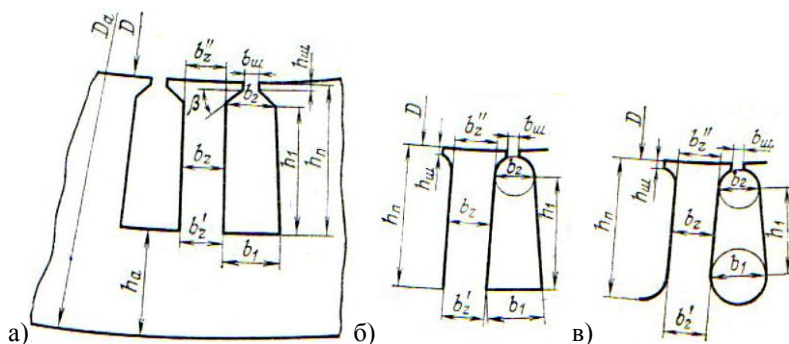


Рис. 2.4. До розрахунку розмірів зубцевої зони всипної обмотки статора.

В двигунах серії 4А виконують тільки трапецеїдальні (рис.2.4,а) з кутом нахилу граней клинової частини $\beta = 45^\circ$ у двигунах з $h \leq 250$ мм і $\beta = 30^\circ$ у двигунах з $h \geq 280$ при $2p=10,12$.

Принцип розрахунку розмірів пазу всипної обмотки такий самий, як і для пазів з прямокутними проводами. Спочатку проводять попередній вибір розмірів, виходячи з допустимої індукції в ярі та в зубцях статора.

Ширина зубця статора:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} \quad (2.32)$$

Висота яра статора визначається за формулою (2.20).

Знаходять розміри пазу в штампі:

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a \quad (2.33)$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{z1} \quad (2.34)$$

Розмір b_2 визначають в залежності від кута β :

- при $\beta = 45^\circ$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_n - b_w) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} \quad (2.35)$$

- при $\beta = 30^\circ$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{ш}} - b_{\text{ш}}/\sqrt{3}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi/\sqrt{3}} \quad (2.36)$$

Отримані розміри округляють до десятих долей міліметра.

Висоту шліцу пазу в двигунах з $h \leq 132$ мм приймають $h_{\text{ш}} = 0,5$ мм , в двигунах з $h \geq 160$ мм збільшують до $h_{\text{ш}} = 1$ мм.

Ширину шліцу $b_{\text{ш}}$ приймають $b_{\text{ш}} = d_{\text{із}} + (1,5 \dots 2)$ мм. В двигунах серії 4А цей розмір виконується рівним від 1,8 мм в малих машинах, до 4 мм - в більш потужних. Середні значення $b_{\text{ш}}$ приведені в табл. 2.8 в залежності від значень h та $2p$.

В клиновій частині паза розміщуються пазові кришки (в машинах з $h \leq 160$ мм) або пазові клинни (в більш потужних машинах). Тому при розрахунках площі поперечного перерізу ці ділянки не враховуються.

Таблиця 2.7. Середні значення ширини шліцу напівзакритих пазів статорів асинхронних двигунів з обмоткою із круглого проводу, мм.

h , мм	Число полюсів двигуна $2p$				
	2	4	6-8	10	12
50-63	1,8	1,8	1,8	-	-
71	2	2	2	-	-
80-90	3	3	2,7	-	-
100,112	3,5	3,5	3	-	-
132	4	3,5	3,5	-	-
160-250	4	3,7	3,7	-	-
280-315	-	-	-	4	4

Для розрахунку коефіцієнту заповнення пазу необхідно визначити розміри пазу "в світу" і врахувати площу поперечного перерізу пазу, що займає корпусна ізоляція $S_{\text{із}}$ і прокладки в пазу $S_{\text{пр}}$.

Розміри пазу "в світу" визначають з врахуванням припусків на шихтовку осердя Δb_n та Δh_n :

$$b_1' = b_1 - \Delta b_n \quad (2.37)$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_n \quad (2.38)$$

$$h_n' = h_n - \Delta h_n \quad (2.39)$$

Значення Δb_n та Δh_n приймаються по таблиці 2.6.

Площа корпусної ізоляції, м^2 ,

$$S_{iz} = b_{iz} \cdot (2h_n + b_1 + b_2) \quad (2.40)$$

де b_{iz} - одностороння товщина ізоляції в пазу, м.

Площа прокладок в пазу, м^2 :

- для двигунів з $h = 180-250$ мм

$$S_{np} = 0,4b_1 + 0,9b_2 \quad (2.41)$$

- для двигунів з $h \geq 280$ мм

$$S_{np} = 0,6(b_1 + b_2) \quad (2.42)$$

При одношаровій обмотці $S_{np} = 0$.

Площа поперечного перерізу паза, що залишається для розміщення провідників обмотки,

$$S_n' = \frac{b_1' + b_2'}{2} \cdot h_1' - S_{iz} - S_{np} \quad (2.43)$$

Перевіркою правильності розміщення обмотки в пазах є значення коефіцієнту заповнення паза:

$$\kappa_3 = \frac{d_{iz} \cdot u_n \cdot n_{el}}{S_n'} \quad (2.44)$$

Значення κ_3 повино знаходитися у межах (0,69-0,71) для двигунів з $2p=2$ і - (0,72-0,74) для двигунів з $2p \geq 4$.

Якщо отримане значення κ_3 нижче вказаних меж, то площу паза слід зменшити за рахунок збільшення h_a або b_z , або обох розмірів одночасно в залежності від прийнятого при їх розрахунку значення індукції. Індукція в зубцях і ярмі статора при цьому зменшиться. Зменшення індукції нижче меж, що приведені в табл. Додатку Е показує, що головні розміри двигуна завищені і активна сталь недовикористовується. В цьому випадку слід зменшити довжину осердя або перейти на ближчу меншу висоту осі обертання.

Якщо отримане значення κ_3 вище вказаних меж, то площу паза слід збільшити за рахунок h_a або b_z , вибрав максимально допустимі значення B_z і

B_a . До зменшення κ_3 приводить також зменшення числа елементарних провідників n_{el} , яке можливе при одночасному пропорційному збільшенні площі поперечного перерізу елементарного проводу або зменшення числа паралельних гілок обмотки з тим, щоб щільність струму залишилася незмінною. Якщо і при цьому κ_3 залишається вище вказаних меж, то прийняті головні розміри двигуна занижені. Необхідно збільшити довжину магнітопроводу або перейти на ближчу більшу висоту осі обертання.

Після уточнення розмірів паза ширину зубця і розрахункову висоту паза визначають за формулами табл. 2.8.

Таблиця 2.8. Розрахункові розміри зубців статорів при трапецеїдальних або грушевидних пазах в машинах з обмоткою з круглого проводу

Розмір	Рис.2.4, а	Рис.2.4, б	Рис.2.4, в
b'_Z	$\pi \cdot \frac{D + 2 \cdot (h_u + h_k)}{Z} - b_1$	$\pi \cdot \frac{D + 2h_u + b_1}{Z} - b_1$	$\pi \cdot \frac{D + 2h_u + b_1}{Z} - b_1$
b''_Z	$\pi \cdot \frac{D + 2h_n}{Z} - b_2$	$\pi \cdot \frac{D + 2h_n}{Z} - b_2$	$\pi \cdot \frac{D + 2h_n - b_2}{Z} - b_2$
h_Z	h_n	h_n	$h_n - 0,1 \cdot b_2$

Звичайно при всипній обмотці $b_{Z1} = b'_{Z1} = b''_{Z1}$. В деяких випадках можливе деяке розходження значень b'_{Z1} і b''_{Z1} , тому рекомендується розраховувати обидва значення b'_{Z1} і b''_{Z1} і при невеликих розходженнях результатів взяти середню розрахункову ширину зубця: $b_{Z1} = 0,5(b'_{Z1} + b''_{Z1})$. При більших розходженнях слід змінити співвідношення розмірів паза.

3. ВИБІР ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ

Вірний вибір повітряного зазору δ в основному визначає енергетичні показники асинхронного двигуна. В сучасних асинхронних двигунах зазор вибирають, виходячи з мінімуму сумарних втрат. Так як при збільшенні зазору втрати в міді збільшуються, а поверхнісні та пульсаційні втрати зменшуються, то існує оптимальне співвідношення між параметрами, при якому сума втрат буде найменшою.

При учбовому проектуванні величину повітряного зазору вибирають, керуючись даними двигунів, що випускають (рис.3.1) або, користуючись наближеними формулами.

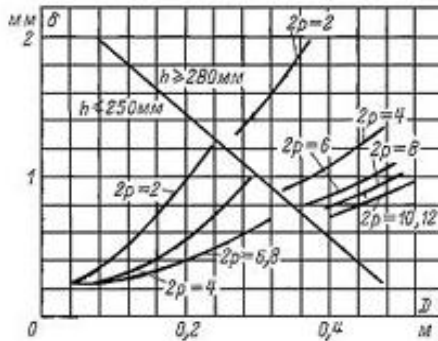


Рис. 3.1. До вибору повітряного зазору в асинхронних двигунах.

Для двигунів потужністю менше 20 кВт повітряний зазор, м:

$$\text{— при } 2p=2 \quad \delta \approx (0,3 + 1,5 \cdot D) \cdot 10^{-3}; \quad (3.1)$$

$$\text{— при } 2p \geq 4 \quad \delta \approx (0,25 + D) \cdot 10^{-3}; \quad (3.2)$$

Для двигунів середньої та великої потужності:

$$\delta \approx \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

Повітряний зазор, що отриманий по емпіричним формулам або з графіків, слід округляти до 0,05 мм при $\delta < 0,5$ мм і до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм. Наприклад, зазор вибирають рівним 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм і т.д.

4. РОЗРАХУНОК РОТОРА

4.1. Розрахунок короткозамкнутого ротора

Визначають кількість пазів ротора Z_2 , виходячи з найкращого співвідношення Z_1 та Z_2 . Рекомендації по вибору Z_2 при відомих Z_1 і $2p$ зведені до таблиці 2.2, в якій пропонується декілька можливих варіантів чисел пазів ротора при даних Z_1 і $2p$. В двигунах малої потужності звичайно виконують $Z_2 < Z_1$. В двигунах більшої потужності іноді виконують $Z_2 > Z_1$ для того, щоб обмежити надто великий струм в стержнях ротора і збільшити рівномірність розподілу провідників обмотки по довжині розточки.

Значення струму в обмотці ротору, A ,

$$I_2 = \kappa_i \cdot I_1 \cdot \nu_i, \quad (4.1)$$

де κ_i - коефіцієнт, що враховує вплив струму намагнічування на відношення I_1/I_2 . Це значення наближено може бути визначено в залежності від номінального $\cos \varphi$, яким задавались на початку розрахунків:

$$\kappa_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi, \quad (4.2)$$

ν_i - коефіцієнт приведення струмів:

$$\nu_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot \kappa_{об1}}{Z_2 \cdot \kappa_{ск}}, \quad (4.3)$$

де $\kappa_{ск}$ - коефіцієнт скосу, що враховує зменшення ЕРС обмотки при скошених пазах ротора:

$$\kappa_{ск} = \frac{2 \cdot \sin(\gamma_{ск} / 2)}{\gamma_{ск}}, \quad (4.4)$$

$$\text{де } \gamma_{ск} = \beta_{ск} \cdot \frac{2p}{Z}; \beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{t_2}, \quad (4.5)$$

де $b_{ск}$ – скіс пазів, мм.

Зі скошеними пазами виконують, в основному, машини невеликої потужності з малим числом q , а також двигуни в малолінійному виконанні.

Переріз стержня, м^2 ,

$$q_c = I_2 / J_2 \quad (4.6)$$

Щільність струму в стержні ротору машин закритого виконання, двигуна, що обдувається, при заливці пазів алюмінієм вибирають у межах $J_2 = (2,5 - 3,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, а при захищеному виконанні на 10-15 % вище, при цьому, для машин більших потужностей слід брати менші значення щільності струму.

В обмотці ротора, що виконана з мідних стержнів, щільність струму приймають дещо більшою: $J_2 = (4,0 - 8,0) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, (більші значення відповідають машинам меншої потужності).

Щільність струму в замикаючих кільцях $J_{кл}$ вибирають у середньому на 15-20 % менше, ніж в стержнях.

Площа поперечного перерізу замикаючих кілець, м^2 ,

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} \quad (4.7)$$

Струм в кільці:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta}, \quad (4.8)$$

$$\text{де} \quad \Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \quad (4.9)$$

Переріз кілець в роторах з вставними стержнями представляє собою прямокутник, розміри якого ($h_{кл}$ і $b_{кл}$) вибирають таким чином, щоб $h_{кл} = (1,1 - 1,25) \cdot h_{п2}$ (рис.4.1,а)

Замикаючі кільця литої обмотки звичайно виконують з поперечним перерізом у вигляді неправильної трапеції (рис.4.1,б). Середня висота кільця вибирається з умови $h_{кл} \geq 1,2 \cdot h_{п2}$.

Ширину замикаючих кілець обох типів розраховують виходячи з $q_{кл}$ і вибраної $h_{кл}$:

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}}. \quad (4.10)$$

Середній діаметр замикаючих кілець:

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл}. \quad (4.11)$$

Одночасно з заливкою стержнів та кілець на замикаючих кільцях відливають вентиляційні лопатки, довжина яких дещо менша, ніж довжина вильоту лобових частин обмотки статора. Кількість вентиляційних лопаток вибирають приблизно в 2-3 рази менше, ніж число пазів ротору.

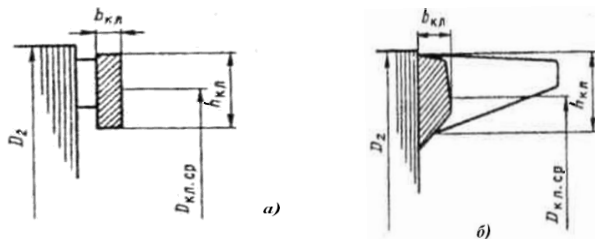


Рис. 4.1. Розміри замикаючих кілець короткозамкнутого ротору. а – зі зварною обмоткою; б – з литою обмоткою.

Форма паза і конструкція обмотки короткозамкнутого ротора визначаються вимогами до пускових характеристик двигуна, його потужністю і числом полюсів. В АД потужністю до 50-60 кВт звичайно виконують грушеподібні пази і литу обмотку з алюмінію (рис. 4.2, а). Розміри паза вибирають такими, щоб зубці ротора мали паралельні грані.

Ротори більш потужних машин з прямокутними пазами виконують із вставними мідними стержнями або литою алюмінієвою обмоткою (рис. 4.2, в,г). Прямокутні відкриті пази зустрічаються в короткозамкнутих роторах багатополюсних АД (рис. 4.2, д).

Для збільшення пускових моментів двигунів прямокутні пази виконують вузькими та глибокими, так як ефект витіснення струму в них збільшується зі збільшенням висоти стержня. Ротори з такими пазами називають глибокопазними.

В АД при невеликому числі полюсів часто не вдається отримати бажаний пусковий момент навіть з глибокопазними роторами, тому переходять до роторів з фігурними пазами (рис. 4.2, е-і). Всі вони мають зменшену ширину верхньої частини паза, порівняно

з нижньою, що дозволяє більше використати ефект витіснення струму при великих ковзаннях.

АД, що призначені для приводів механізмів з важкими умовами пуску, часто виконують з двохкліточними роторами (рис. 4.2, к,л).

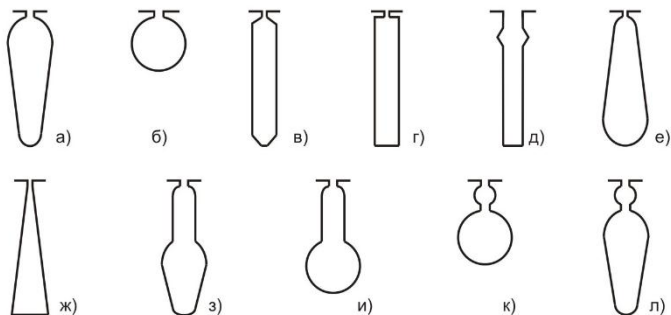


Рис.4.2 Конфігурації пазів роторів короткозамкнутих АД.

В більшості АД з короткозамкнутим ротором з висотами осі обертання до 250 мм застосовуються ротори з литими обмотками, для яких можливе виконання будь-яких конфігурацій і розмірних співвідношень стержнів з врахуванням можливості якісної заливки.

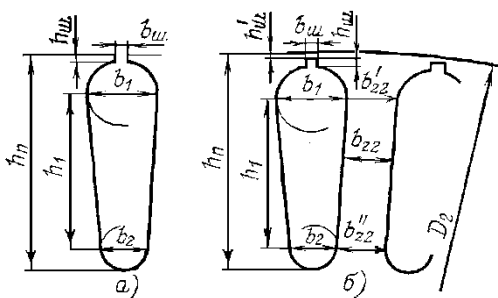


Рис. 4.3 . Грушеподібні пази короткозамкнутого ротора.
а – напівзакриті; б – закриті.

Для забезпечення високих енергетичних показників номінального режиму слід орієнтуватися на пази ротору з широкою

верхньою частиною – грушеподібні (рис.4.3). Пази інших форм (прямокутні, фігурні) або подвійну клітину застосовують тільки в тих випадках, коли пускові характеристики двигуна з ротором, що має грушеподібні пази, не задовольняє вимогам, що поставлені в завданні.

В асинхронних двигунах з короткозамкнутим ротором серії 4А з висотою осі обертання $h \leq 250$ мм виконують грушеподібні пази і литу обмотку на роторі. В двигунах з $h < 160$ мм пази мають вузький проріз (рис.4.3, а) з наступними розмірами:

- при висоті осі обертання $h < 100$ мм $b_{ш} = 1,0$ мм і $h_{ш} = 0,5$ мм;
- при висоті осі обертання $h = 112-132$ мм $b_{ш} = 1,5$ мм і $h_{ш} = 0,75$ мм.

В двигунах з $h = 160-250$ мм виконують грушеподібні закриті пази (рис.4.3, б) з розмірами шліцу $b_{ш} = 1,5$ мм і $h_{ш} = 0,7$ мм. Висота перемички над пазом в двигунах з $2p \geq 4$ виконується рівною $h_{ш}' = 0,3$ мм, при $p = 2$ $h_{ш}' = 1,0-1,5$ мм.

Розміри пазу b_1, b_2, h_1 (рис.4.3) розраховують, виходячи з перерізу стержня q_c і умови постійності ширини зубців ротору:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot \left(D_2 - 2 \cdot h_{ш} - 2 \cdot h_{ш}' \right) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} \quad (4.12)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2 + \pi}{\pi} \right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad (4.13)$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} \quad (4.14)$$

Ширина зубців ротору визначається по допустимій індукції B_{z2} (див. Додаток Е)

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_2}{B_{z2} \cdot \ell_{cm2} \cdot \kappa_c} \quad (4.15)$$

Після розрахунків розміри пазу слід округлити до десятих частин міліметра і уточнити площу перерізу стержня q_c :

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) \cdot h_1 \quad (4.16)$$

Умови високоякісної заливки пазів алюмінієм вимагають, щоб діаметр заокруглення нижньої частини пазу в двигунах з $h \leq 132$ мм був не менше 1,5-2 мм, а в двигунах з $h \geq 160$ мм - не менше 2,5-3 мм.

В зв'язку з округленням результатів розрахунків необхідно перерахувати ширину зубців в перерізах b_{z2}' і b_{z2}'' по остаточно прийнятим розмірам пазу:

$$b_{z2}' = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot (h_{uu} + h_{uu}') - b_1}{Z_2} - b_1 \quad (4.17)$$

$$b_{z2}'' = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_n + b_2}{Z_2} - b_2 \quad (4.18)$$

При незначних розходженнях розмірів b_{z2}' і b_{z2}'' в розрахунках магнітної напруги зубців ротору використовують середню ширину зубця $b_{z2} = (b_{z2}' + b_{z2}'') / 2$. При значних розходженнях розрахунок виконують так, як і для трапецеїдальних зубців ротору.

Розрахункова висота зубця приймається рівною:

$$h_{z2} = h_n - 0,1 \cdot b_2 \quad (4.19)$$

В двигунах з висотою осі обертання $h = 280 - 355$ мм виконують закриті пази ротору: при $2p \geq 4$ – трапецеїдальні, що звужуються у верхній частині (рис.4.4,а) і при $2p=2$ - лопаточні (рис. 4.4,б).

Для розрахунку розмірів трапецеїдальних пазів, які звужуються у верхній частині, доцільно використовувати графоаналітичний метод. Найменша допустима ширина зубця $b_{z2\min}$ знаходиться по $B_{z2\max}$ (Додаток Е). На побудованому в достатньо великому масштабі ескізі зубцевого ділення ротору, змінюють b_2 та h_n і графічно визначають

розміри пазу по заданій площі перерізу стержня q_c , при яких $B_{z2\max}$ знаходиться в допустимих межах. Висота перемички над пазом приймається рівною $h_{uw}' = 0,5$ мм. Діаметр заокруглення верхньої частини пазу повинен бути не менше $b_1 \geq 3,5-4$ мм. Після побудови визначають ширину зубця ротору:

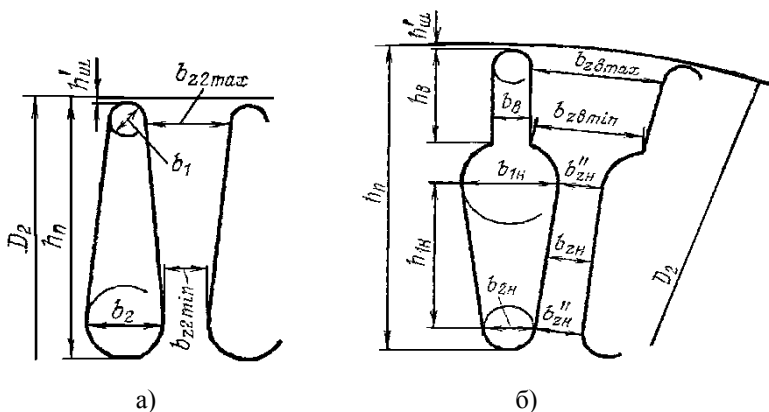


Рис.4.4. Трапецеїдальні (а) та лопаточні (б) пази короткозамкнутого ротору.

$$b_{z2\max} = \pi \cdot \frac{D_2 - (2 \cdot h_{uw}' + b_1)}{Z_2} - b_1 \quad (4.20)$$

$$b_{z2\min} = \pi \cdot \frac{D_2 - (2 \cdot h_n - b_2)}{Z_2} - b_2 \quad (4.21)$$

Розрахункова висота зубця:

$$h_{z2} = h_n - 0,1 \cdot b_2 \quad (4.22)$$

В лопаточних пазах висота верхньої частини пазу h_B для отримання найбільшого ефекту витіснення струму під час пуску, при литій алюмінієвій обмотці, виконується рівною 15-16 мм. Розміри нижньої частини лопаточних стержнів розраховують, виходячи із перерізу стержня q_c і постійної ширини зубців ротору:

$$b_{1n} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{1n}' - 2 \cdot h_{\epsilon}) - Z_2 \cdot b_{z2n}}{\pi + Z_2} \quad (4.23)$$

де b_{z2n} - ширина зубця на нижній ділянці, що визначається по допустимій індукції в зубцях ротора;

h_{1n}' - висота перемички над пазом. Для двигунів з $2p=2$ приймають $h_{1n}' = 1-2$ мм.

Необхідний переріз нижньої частини стержня:

$$q_{c,n} = q_c - q_{c,\epsilon} \quad (4.24)$$

де переріз верхньої частини стержня:

$$q_{c,\epsilon} = b_{\epsilon} \cdot (h_{\epsilon} - 0,11 \cdot b_{\epsilon}) \quad (4.25)$$

Ширина верхньої частини стержня:

$$b_{\epsilon} = (0,5 - 0,65) \cdot b_{1n} \quad (4.26)$$

Діаметр заокруглення нижньої частини стержня:

$$b_{2n} = \sqrt{\frac{b_{1n}^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_{c,n}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad (4.27)$$

Найменший допустимий розмір $b_{2n} = 3-4$ мм. Якщо $b_{2n} < 3$ мм, слід або зменшити переріз стержня (збільшити густину струму у ньому) або дещо збільшити індукцію в зубцях ротору.

Відстань між центрами заокруглення нижньої частини стержня:

$$h_{1n} = (b_{1n} - b_{2n}) \cdot \frac{Z_2}{2\pi} \quad (4.28)$$

Після округлення отриманих розмірів до десятих частин міліметра уточнюється площа перерізу стержня ротору: $q_{c,\epsilon}$ по (4.24) і

$$q_{c,n} = \frac{\pi}{8} \cdot (b_{1n}^2 + b_{2n}^2) + (b_{1n} + b_{2n}) \cdot \frac{h_{1n}}{2} \quad (4.29)$$

$$q_c = q_{c,\epsilon} + q_{c,n} \quad (4.30)$$

Розміри зубців у верхніх та нижніх частинах розраховують окремо.

Розміри верхньої частини зубця:

$$b_{z\theta \max} = \pi \cdot \frac{D_2 - (2 \cdot h_{u\theta}' + b_{\theta})}{Z_2} - b_{\theta} \quad (4.31)$$

$$b_{z\theta \min} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2h_{\theta}'}{Z_2} - b_{\theta} \quad (4.32)$$

де
$$h_{\theta}' = h_{\theta} + h_{u\theta}' \quad (4.33)$$

Розміри нижньої частини зубця:

$$b_{zn}' = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{\theta}' - b_{1n} - b_{1n}}{Z_2} - b_{1n} \quad (4.34)$$

$$b_{zn}'' = \pi \cdot \frac{D_2 - (2 \cdot h_n - b_{2n})}{Z_2} - b_{2n} \quad (4.35)$$

Розрахункова висота ділянок зубця:

- верхнього
$$h_{z\theta} = h_{\theta}' \quad (4.36)$$

- нижнього
$$h_{zn} = h_n - 0,1 \cdot b_{2n} \quad (4.37)$$

В короткозамкнутих роторах з обмоткою із вставних алюмінієвих шин виконують відкриті прямокутні пази (рис. 4.5).

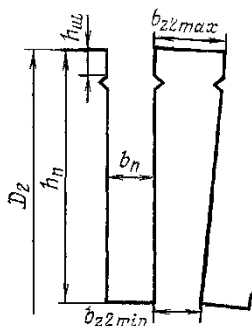


Рис.4.5. Прямокутні пази короткозамкнутого ротору з обмоткою із алюмінієвих шин.

Розміри пазу знаходять, виходячи з допустимої ширини зубця $b_{z2\min}$, що визначається по допустимій $B_{z2\max}$. Ширина пазу:

$$b_n = \frac{(t_2 - b_{z2\min}) \pm \sqrt{(t_2 - b_{z2\min})^2 - S_{n2} \cdot \frac{8\pi}{Z_2}}}{2} \quad (4.38)$$

де S_{n2} - повна площа поперечного перерізу пазу, яка попередньо вибирається рівною:

$$S_{n2} \approx 1,1 \cdot q_c \quad (4.39)$$

З двох можливих значень b_n , що отримані по (4.38), слід вибрати те, що задовольняє конструкції. Ширина алюмінієвої шини повинна бути менше ширини пазу в штампі на припуск на збірку осердя Δb_n (див.табл.2.5). Розміри пазу остаточно визначаються після вибору стандартного перерізу і розмірів алюмінієвої шини.

Висота паза:

$$h_n = h_c + \Delta h_n + h_{uu} \quad (4.40)$$

де Δh_n визначається по таблиці 2.5;

h_{uu} - висота шліцу, в роторах такої конструкції виконується 4 мм;

h_c - висота стержня

$$h_c = q_c / b_c \quad (4.41)$$

Найбільша та найменша ширина зубців при прямокутних пазах ротора визначаються за наступними формулами:

$$b_{z2\min} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{n2})}{Z_2} - b_{n2} \quad (4.42)$$

$$b_{z2\max} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} - b_{n2} \quad (4.43)$$

Розрахункова висота зубця приймається рівною висоті паза:

$$h_z = h_n \quad (4.44)$$

4.2. Розрахунок осердя ротора

Осердя роторів асинхронних двигунів при $D_2 < 900$ мм виконують з безпосередньою посадкою на вал без проміжної втулки. В двигунах з висотою осі обертання $h \leq 250$ мм застосовують посадку осердя на гладкий вал без шпонки. В двигунах більших розмірів осердя кріплять на валу за допомогою шпонки. Якщо діаметр ротору перевищує 990 мм, то осердя шихтують із окремих сегментів і закріплюють на втулці ротора або на повздовжніх ребрах, які приварені до валу.

В більшості двигунів з висотою осі обертання $h \geq 250$ мм виконують аксіальні канали для поліпшення умов охолодження ротору, зниження його маси і моменту інерції.

Аксіальні канали (рис. 4.6) можуть бути розміщені в одному ряду ($m_{k2}=1$) або при великих діаметрах ротору в двох рядах ($m_{k2}=2$).

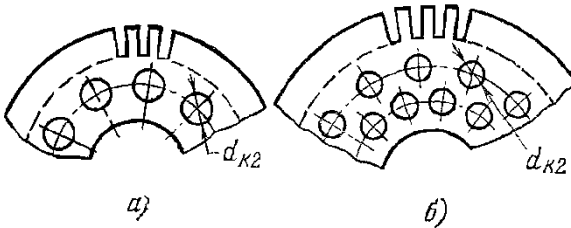


Рис.4.6. Аксіальні вентиляційні канали в осерді ротору:

а – розміщення каналів в один ряд ($m_{k2}=1$);

б - розміщення каналів в два ряди ($m_{k2}=2$).

Число аксіальних каналів в осерді ротору звичайно сягає від 9 до 12, а їх діаметр (d_{k2}) – у межах від 15 до 30 мм. Більші діаметри виконують в роторах двигунів з більшим числом полюсів. При розміщенні каналів в два ряди їх діаметри зменшують.

Радіальні канали в осерді ротору, також як і в статорі, виконують лише при довжині осердя, що перевищує 0,25-0,3 м.

Внутрішній діаметр осердя ротору D_j при безпосередній посадці на вал дорівнює діаметру валу D_e і може бути визначений за формулою:

$$D_e \approx \kappa_e \cdot D_a \quad (4.45)$$

Значення коефіцієнту κ_e приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Значення коефіцієнту κ_e .

h , мм	50-63	71-250	280-355		400-500		
$2p$	2-6	2-8	2	4-12	4	6	8-12
κ_e	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Якщо осердя ротору насаджено на втулку або оребрений вал, то внутрішній діаметр D_j , м, визначається, виходячи з допустимої індукції в ярі ротору, з використанням наступних виразів:

$$h_j = \frac{\Phi}{2 \cdot B_j \cdot \ell_{cm2} \cdot \kappa_c} \quad (4.46)$$

$$D_j = D_2 - 2 \cdot (h_{n2} + h_j) \quad (4.47)$$

5. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА

Розрахунок магнітного ланцюга проводять для режиму холостого ходу двигунів, при якому для асинхронних машин характерне відносно сильне насичення сталі зубців статора і ротора.

5.1. Магнітна напруга повітряного зазору

Визначають магнітну напругу повітряного зазору, A ,

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot \kappa_{\delta}, \quad (5.1)$$

де B_{δ} - індукція в повітряному зазорі, Тл;

κ_{δ} - коефіцієнт повітряного зазору :

$$\kappa_{\delta} = \frac{t}{t - \gamma \cdot \delta} \quad (5.2)$$

або

$$\kappa_{\delta} = \frac{t + 10\delta}{b_n + 10\delta},$$

де

$$\gamma = \frac{(b_u / \delta)^2}{5 + b_u / \delta} \quad (5.3)$$

δ - повітряний зазор, м;

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

5.2. Магнітна напруга зубцевої зони статора

Визначають магнітну напругу зубцевої зони статора, A ,

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{Z1} \cdot H_{Z1} \quad (5.4)$$

де h_{Z1} - розрахункова висота зубця статора, м;

H_{Z1} - розрахункова напруженість поля в зубці, А/м.

Напруженість поля в зубці визначають по кривим намагнічування для зубців прийнятої при проектуванні марки сталі (див. Додаток Ж). Розрахункову висоту зубців h_{Z1} та розрахункову напруженість поля H_{Z1}

визначають по-різному в залежності від конфігурації зубців, що пов'язана з формою пазів статора.

Для зубців з паралельними гранями (в статорах з грушеподібними або трапецеїдальними пазами по рис. 2.4) індукція в зубці:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot \kappa_c} \quad (5.5)$$

де b_{z1} - розрахункова ширина зубця, м, визначається по формулам таблиці 2.7; якщо розміри b'_{z1} і b''_{z1} однакові, то $b_{z1} = b'_{z1} = b''_{z1}$; якщо розміри відрізняються менше ніж на 0,5 мм, то $b_{z1} = 0,5(b'_{z1} + b''_{z1})$. Якщо різниця перевищує 0,5 мм потрібно або скорегувати розміри паза, або визначати розрахункову напруженість поля H_{z1} , як для зубців зі змінною площею поперечного перерізу (див. нижче).

Розрахункова напруженість поля, А/м, $H_{z1} = \int(B_{z1})$.

Розрахункова висота паза h_{z1} визначається по табл.2.8.

Для зубців зі змінною площею поперечного перерізу (в статорах з прямокутними пазами по рис. 2.3.) розрахункова висота зубця $h_{z1} = h_n$.

Розрахункова напруженість поля:

$$H_{z1} = (H_{z1\max} + 4H_{z1cp} + H_{z1\min}) / 6 \quad (5.6)$$

де - $H_{z1\max}$, $H_{z1\min}$, H_{z1cp} - напруженості поля в найменшому, найбільшому та середньому перетинах зубця, які визначені по індукціям в цих перетинах:

$$B_{z1\max}, B_{z1\min} \text{ і } B_{z1cp} = 0,5(B_{z1\max} + B_{z1\min}).$$

Індукції $B_{z1\max}$, $B_{z1\min}$ розраховують по (5.5), підставляючи замість розміру b_{z1} відповідно найменше та найбільше значення ширини зубця, м, що розраховані по формулам табл.2.6.

Якщо індукція в перетину зубця буде більше 1,8 Тл, то необхідно враховувати відгалуження частини потоку зубцевого ділення $\Phi_z = B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}$ в паз, при якому дійсна індукція в зубці зменшується порівняно з розрахунковою.

Розрахункова індукція, що визначається повним потоком в перерізі зубця S_{Zx} , якщо вважати, що потік в пазу відсутній:

$$B'_{Zx} = B_{Zx} + \mu_0 \cdot H_{Zx} \cdot \kappa_{nx}, \quad (5.7)$$

де B_{Zx} - дійсна індукція в перерізі зубця S_{Zx} ;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м};$$

κ_{nx} - коефіцієнт, що визначає відношення площ поперечних перерізів паза і зубця на висоті h_{Zx} :

$$\kappa_{nx} = \frac{b_{nx} \cdot l_{\delta}}{b_{Zx} \cdot l_{cm} \cdot \kappa_c}, \quad (5.8)$$

де b_{nx} можна визначити за формулою:

$$b_{nx} = \frac{b_1 + b_2}{2}. \quad (5.9)$$

В машинах нормального виконання κ_{nx} для різних по висоті зубця перерізів звичайно знаходиться у межах $\kappa_{nx} = 0,5-2,0$.

Спочатку знаходиться розрахункова індукція по повному потоку зубцевого ділення:

$$B'_{Zx} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{Zx1} \cdot l_{cm1} \cdot \kappa_c}. \quad (5.10)$$

Після цього задаються значенням B_{Zx} дещо меншим, ніж B'_{Zx} і підбором знаходять дійсну індукцію B_{Zx} і відповідне їй значення H_{Zx} , при якому виконується рівняння (5.7). Для полегшення розрахунків в додатку 3 приведені криві, що дозволяють визначити H_{Zx} безпосередньо по розрахунковій індукції B'_{Zx} , з врахуванням фіксованих значень коефіцієнту κ_{nx} .

5.3. Магнітна напруга зубцевої зони ротора

Розрахунок магнітного опору зубцевої зони ротора залежить від форми пазів і типу ротора: фазний ротор або короткозамкнутий з однією обмоткою ("білячою клітиною") або короткозамкнутий ротор з двома обмотками – робочою та пусковою, також ротори з фігурними пазами.

Магнітна напруга зубцевої зони фазного і короткозамкнутого роторів з однією "білячою клітиною" з прямокутними або трапецеїдальними пазами.

Загальна формула розрахунку магнітної напруги:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2} \quad (5.11)$$

де h_{Z2} - розрахункова висота зубця ротора (по табл. 5.1), м;

H_{Z2} - розрахункова напруженість поля в зубці ротора, А/м.

Розрахункова напруженість поля H_{Z2} в зубцях з паралельними гранями (див.рис.4.3 а,б), Тл, визначається в залежності від індукції в зубці:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot \kappa_{c2}}, \quad (5.12)$$

де κ_{c2} - коефіцієнт заповнення осердя ротора сталлю (табл. 2.4);

b_{z2} - розрахункова ширина зубця ротора, м, визначається по формулам таблиці 5.1.

Якщо розрахунки b'_{Z2} і b''_{Z2} дають однакові результати, то $b_{Z2} = b'_{Z2} = b''_{Z2}$; якщо розміри відрізняються менше ніж на 0,5 мм, то $b_{Z2} = 0,5(b'_{Z2} + b''_{Z2})$. Якщо різниця перевищує 0,5 мм потрібно або скорегувати розміри паза, або визначати розрахункову напруженість поля H_{Z2} як для зубців зі зміним перетином поперечного перерізу (див. нижче).

Розрахункова напруженість поля в зубці, А/м, $H_{Z2} = f(B_{Z2})$.

Розрахункова напруженість в зубцях ротора зі змінною площею поперечного перерізу (по рис. 4.5) Розрахункова напруженість поля визначається як середня:

$$H_{Z2} = (H_{Z2\max} + 4H_{Z2cp} + H_{Z2\min}) / 6 \quad (5.13)$$

де - $H_{Z2\max}$, $H_{Z2\min}$, H_{Z2cp} - напруженості поля в найменшому, найбільшому та середньому перерізах зубця, які визначені по індукціям в цих перерізах:

$$B_{Z2\max}, B_{Z2\min} \text{ і } B_{Z2cp} = 0,5(B_{Z2\max} + B_{Z2\min}).$$

Індукції $B_{Z2\max}, B_{Z2\min}$ розраховують по (5.5) підставляючи замість розміру b_{Z2} відповідно найменше та найбільше значення ширини зубця, м, що розраховані по формулам табл.5.1.

Таблиця 5.1. Розміри зубців фазних і короткозамкнутих одноклітинних роторів з прямокутними та трапецеїдальними пазами.

Розмір	Форма пазів роторів			
	По рис.			
$b_{Z\max}$	$\frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} - b_n$	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2(h_{uu} + h_k)}{Z_2} - b_n$	-	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2(h'_{uu} + h_1)}{Z_2} - b_1$
$b_{Z\min}$	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2h_n}{Z_2} - b_n$	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2h_n}{Z_2} - b_n$	-	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2h_n + b_2}{Z_2} - b_2$
$b_{Z1/3}$	$\pi \cdot \frac{D_2 - \frac{4}{3}h_n}{Z_2} - b_n$	$\pi \cdot \frac{D_2 - \frac{4}{3}h_n}{Z_2} - b_n$	-	$b_{Z\min} + \frac{b_{Z\max} + 2b_{Z\min}}{3}$
h_Z	-	-	$h_n - 0,1b_2$	$h_n - 0,1b_2$
b'_Z	-	-	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2(h_{uu} + h'_{uu})}{Z_2} - b_1$	-
b''_Z	-	-	$\pi \cdot \frac{D_2 - 2(h_n + h_2)}{Z_2} - b_2$	-

При розрахунку магнітної напруги по напруженості поля в перерізі на 1/3 висоти зубця ротора знаходять індукцію $B_{Z1/3}$ (табл.5.1). В цьому випадку розрахункова напруженість:

$$H_{Z2} = H_{Z1/3} = \int(B_{Z1/3}) . \quad (5.14)$$

Якщо при розрахунку магнітної напруги зубців зі змінним перерізом $H_{Z2max}/H_{Z2min} > 2$, то необхідно розділити зубець по висоті на дві рівні частини і визначити середні напруженості в кожній з них окремо. В цьому випадку розрахункова ширина зубця береться на висоті 0,2 і 0,7 всієї висоти зубця від його найвузжчої частини:

$$b_{Z0,2} = b_{Z2min} + 0,2(b_{Z2max} - b_{Z2min}) ; \quad (5.15)$$

$$b_{Z0,7} = b_{Z2min} + 0,7(b_{Z2max} - b_{Z2min}) ; \quad (5.16)$$

Після визначення індукцій $B_{Z0,2}$ і $B_{Z0,7}$ в цих перерізах зубця, знаходять відповідні їм напруженості поля $H_{Z0,2}$ і $H_{Z0,7}$.

Магнітна напруга зубцевої зони, А

$$F_{Z2} = h_{Z2} \cdot (H_{Z0,2} + H_{Z0,7}) \quad (5.17)$$

Для всіх перерізів зубців, розрахункова індукція в яких перевищує 1,8 Тл, необхідно визначити дійсну індукцію, тобто врахувати зменшення потоку в зубці за рахунок відгалуження частини потоку зубцевого ділення в паз, як це приведено для розрахунку зубцевої напруги зубцевої зони статора.

Після розрахунків магнітних напруг $F_{\delta}, F_{Z1}, F_{Z2}$ визначають коефіцієнт насичення зубцевої зони

$$\kappa_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (5.18)$$

Отримане значення k_z дозволяє заздалегідь оцінити правильність вибраних розмірних співвідношень і обмотувальних даних проектованої машини. Якщо $k_z > 1,5 \div 1,6$, має місце надмірне насичення зубцевої зони; якщо $k_z < 1,2$, то зубцева зона мало використана або повітряний зазор узятий дуже великим. В обох випадках в розрахунок повинні бути внесені відповідні корективи.

5.4. Магнітні напруги ярм статора і ротора. Намагнічуючий струм

В подальших розрахунках магнітного ланцюга визначають магнітні напруги ярм статора і ротора.

Магнітна напруга ярма статора, А,

$$F_a = L_a \cdot H_a, \quad (5.19)$$

де L_a - довжина середньої магнітної силової лінії в ярмі статора, м:

$$L_a = (D_a - h_a) / (2p), \quad (5.20)$$

де h_a – висота ярма статора, м:

$$h_a = (D_a - D) / 2 - h_{n1} \quad (5.21)$$

H_a - напруженість поля при індукції B_a , приймається по таблиці Додатку Ж по кривій намагнічення для ярма прийнятої марки сталі, А/м.

Індукція в ярмі статора B_a , Тл.

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_a \cdot \ell_{cm1} \cdot \kappa_{c1}} \quad (5.22)$$

де: h'_a - розрахункова висота ярма статора, м:

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} - \frac{2}{3} \cdot d_{\kappa 1} \cdot m_{\kappa 1}, \quad (5.23)$$

де $d_{\kappa 1}$ и $m_{\kappa 1}$ - діаметр і число рядів аксіальних вентиляційних каналів в статорі. За відсутності каналів $m_{\kappa 1} = 0$.

Магнітна напруга ярма ротора, А,

$$F_j = L_j \cdot H_j, \quad (5.24)$$

де H_j - напруженість поля при індукції B_j по кривій намагнічування ярма для прийнятої марки сталі, А/м;

Індукція в ярмі ротора B_j , Тл.

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot \ell_{cm2} \cdot \kappa_{c2}}, \quad (5.25)$$

де κ_{c2} - коефіцієнт заповнення сталлю ярма ротора (по табл. 2.4);

h'_j - розрахункова висота ярма ротора, м.

Для роторів з посадкою осердя на втулку або на оребрений вал (потужні асинхронні машини) розрахункова висота ярма ротора, м:

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} - \frac{2}{3} d_{\kappa 2} \cdot m_{\kappa 2}, \quad (5.26)$$

де $d_{\kappa 2}$ - діаметр аксіальних каналів ротора;
 $m_{\kappa 2}$ - число рядів аксіальних каналів.

В двигунах з безпосередньою посадкою осердя ротора на вал внутрішній діаметр ротора дорівнює діаметру вала: $D_j = D_B$. В таких двигунах з $2p=2$ або 4 необхідно враховувати, що частина магнітних ліній потоку замикається через вал. Тому в двигунах з $2p=2$ розрахункова висота ярма ротора

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{\Pi 2} \right) - \frac{2}{3} d_{\kappa 2} \cdot m_{\kappa 2}, \quad (5.27)$$

а довжина силових ліній в ярмі, м,

$$L_j = 2h_j, \quad (5.28)$$

де h_j – висота ярма ротора, м:

$$h_j = (D_a - D_B) / 2 - h_{n2}. \quad (5.29)$$

В двигунах з $2p=4$ з безпосередньою посадкою осердя ротора на вал, що мають розмірні співвідношення, при яких $0,75 \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) < D_B$, розрахункова висота ярма ротора визначається по (5.1), при інших розмірних співвідношеннях – по (5.1).

Довжина середньої магнітної лінії в ярмі ротора всіх двигунів, окрім двополюсних, з безпосередньою посадкою осердя ротора на вал, м:

$$L_j = \pi \cdot (D_j + h_j) / (2p), \quad (5.30)$$

де висота спинки ротора

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\Pi 2}. \quad (5.31)$$

Для двигунів з $2p \geq 6$ з безпосередньою посадкою осердя ротора на вал h'_j визначають по (5.27).

Сумарна магнітна напруга магнітного ланцюга машини (на пару полюсів), А,

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j. \quad (5.32)$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга

$$k_{\mu} = \frac{F_{\eta}}{F_{\delta}} \quad (5.33)$$

Струм, що намагнічує:

$$I_{\mu} \approx \frac{p \cdot F_{\eta}}{0,9m_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}}. \quad (5.34)$$

I_{μ} - виражається також у відсотках або частках номінального струму:

$$I_{\mu}^* = I_{\mu} / I_{1н}. \quad (5.35)$$

Відносне значення I_{μ}^* служить певним критерієм правильності проведеного вибору і розрахунку розмірів, обмотки двигуна. Так, якщо при проектуванні чотирьохполюсного двигуна середньої потужності розрахунок показав, що $I_{\mu}^* < 0,20 \div 0,18$, то це свідчить про те, що розміри машини вибрані завищеними і активні матеріали невикористані. Такий двигун може мати високі ККД і $\cos\phi$, але погані показники витрати матеріалів на одиницю потужності, велику масу і габарити.

Якщо ж в аналогічному двигуні $I_{\mu}^* > 0,30 \div 0,35$, то це означає, що або його габарити узяті меншими, ніж потрібно, або неправильно вибрані розмірні співвідношення ділянок магнітопроводу. Двигун матиме низькі ККД і $\cos\phi$.

В невеликих двигунах потужністю менше 2-3 кВт I_{μ}^* може досягати значення 0,5-0,6, не дивлячись на правильно вибрані розміри і мале насичення магнітопроводу. Це пояснюється відносно великим значенням магнітної напруги повітряного зазору, характерним для двигуна малої потужності.

6. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ ДЛЯ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ

Параметрами асинхронної машини називають активні та індуктивні опори обмоток статора x_1, r_1 , ротора x_2, r_2 , опір взаємної індуктивності x_{12} і розрахунковий опір r_{12} (або r_μ), додаванням якого враховують вплив втрат в сталі статора на характеристики двигуна.

6.1. Активні опори обмоток статора і фазного ротора

Активні опори r_1 і r_2 Ом, визначаються по формулі

$$r = \kappa_r \cdot \rho_g \cdot \frac{L}{q_{ef} \cdot a}, \quad (6.1)$$

де L - загальна довжина ефективних провідників фази обмотки, м;

q_{ef} - перетин ефективного провідника, м²:

$$q_{ef} = q_{el} \cdot n_{el}; \quad (6.2)$$

q_{el} - перетин елементарного провідника;

n_{el} - число елементарних провідників в одному ефективному;

a - число паралельних гілок обмотки;

ρ_g - питомий опір матеріалу обмотки при розрахунковій температурі, Ом·м;

κ_r - коефіцієнт збільшення активного опору фази обмотки від дії ефекту витіснення струму.

В провідниках обмотки статора асинхронних машин ефект витіснення струму виявляється незначно через малі розміри елементарних провідників. Тому в розрахунках нормальних машин, як правило, приймають $\kappa_r=1$. Деяке збільшення втрат, що обумовлене дією ефекту витіснення струму, відносять до додаткових втрат.

Загальна довжина провідників фази обмотки L , м

$$L = l_{cp} \cdot w, \quad (6.3)$$

де l_{cp} — середня довжина витка обмотки, м;

w — число витків фази.

Середню довжину витка l_{cp} знаходять як суму прямолінійних пазових і зігнутих лобових частин котушки

$$l_{cp} = 2 \cdot (l_n + l_l). \quad (6.4)$$

Довжина пазової частини l_n дорівнює конструктивній довжині осердя машини: $l_n = l_{(2)}$.

Лобова частина котушки має складну конфігурацію (рис. 6.1).

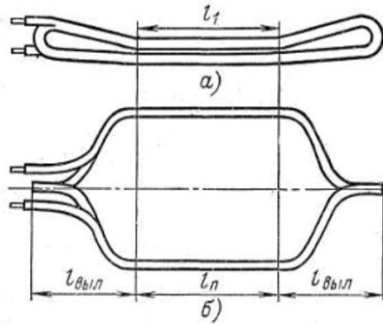


Рис. 6.1. Котушка двошарової обмотки статора. Загальний вигляд.

Для машин малої і середньої потужності, і в більшості випадків для машин великої потужності достатньо точні для практичних розрахунків результати дають емпіричні формули, що враховують основні особливості конструктивних форм котушок.

Котушки виспної обмотки статора. Довжина лобової частини, м

$$l_l = K_l \cdot b_{\text{кт}} + 2 \cdot B; \quad (6.5)$$

виліт лобових частин обмотки, м

$$l_{\text{вл}} = K_{\text{вл}} \cdot b_{\text{кт}} + B. \quad (6.6)$$

В цих формулах:

$b_{\text{кт}}$ - середня ширина котушки, м, яка визначається по дузі кола, що проходить по середині висоти пазів:

$$b_{\text{кт}} = \frac{\pi \cdot (D + h_{m1})}{2p} \cdot \beta_1 \quad (6.7)$$

β_1 - відносне укорочення кроку обмотки статора. Для діамет-ральних двошарових обмоток, виконаних без укорочення кроку, і для одношарових обмоток, включаючи обмотки з концентричних катушок, що мають різну ширину, приймають $\beta_1=1$;

$K_{\text{л}}$ і $K_{\text{вил}}$ — коефіцієнти, значення яких беруть з таблиці 6.1 залежно від числа полюсів машини і наявності ізоляції в лобових частинах;

B - довжини вильоту прямолінійної частини катушок з пазу, від торця осердя до початку відгину лобової частини, м.

Таблиця 6.1. До розрахунку лобових частин катушок всипної обмотки.

Число полюсів 2р	Катушка статора			
	Лобові частини не ізовані		Лобові частини ізовані стрічкою	
	$K_{\text{л}}$	$K_{\text{вил}}$	$K_{\text{л}}$	$K_{\text{вил}}$
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
≥ 8	1,5	0,5	1,9	0,72

Для всипної обмотки, що укладається в пази до запресовки осердя в корпус, беруть $B = 0,01$ м. В машинах, обмотки яких вкладають після запресовки осердя в корпус, виліт прямолінійної частини $B = 0,015$ м.

Катушки з прямокутного проводу. В обмотках статорів і фазних роторів асинхронних двигунів, виконаних з прямокутного проводу, довжина лобової частини витка, м,

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{кт}} + 2 \cdot B + h_{\text{н}}; \quad (6.8)$$

виліт лобової частини обмотки, м

$$l_{\text{вил}} = K_{\text{вил}} \cdot b_{\text{кт}} + B + 0,5 \cdot h_{\text{н}}, \quad (6.9)$$

де $b_{\text{кт}}$ —середня ширина катушки;

для катушок статора розраховується по (6.7);

для катушок ротора

$$b_{\text{кт}} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{\text{н}2})}{2p} \cdot \beta_2; \quad (6.10)$$

B — виліт прямолінійної частини котушок з пазу (по табл. 6.2);

Таблиця 6.2. До розрахунку розмірів лобових частин котушок з прямокутного проводу

Напруга $U_n, В$	$S, м$	$B, м$
<660	0,0035	0,025

$K_l, K_{вил}$ — коефіцієнти, що визначаються з виразів:

$$K_l = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \quad (6.11)$$

$$K_{вил} = \frac{1}{2} K_l \cdot m, \quad (6.12)$$

в яких (рис. 6.2)

$$m = \sin \alpha = (b + S) / t \quad (6.13)$$

b - ширина міді котушки в лобовій частині, м;

S - допустима відстань між міддю провідників сусідніх котушок (по табл. 6.2), м;

t - зубцева поділка, м.

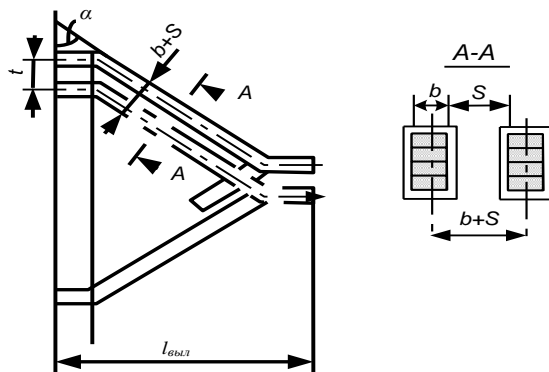


Рис. 6.2. Розміри лобової частини котушки.

6.2. Активний опір фази короткозамкнутого ротора

Активний опір фази короткозамкнутого ротора r_2 є розрахунковим, отриманим з умови рівності електричних втрат в опорі r_2 від струму I_c і сумарних втрат в стрижні і ділянках замикаючих кілець реальної машини:

$$I_c^2 \cdot r_2 = I_c^2 \cdot r_c + 2I_{кл}^2 \cdot r_{кл}, \quad (6.14)$$

де I_c — струм в стрижні ротора;

$I_{кл}$ — струм в замикаючих кільцях;

r_c — опір стрижня;

$r_{кл}$ — опір ділянки замикаючого кільця, укладеного між двома сусідніми стрижнями.

Струм I_c називають струмом ротора і в розрахунках позначають I_2 .

Враховуючи, що

$$I_{кл} = \frac{I_c}{\Delta} = \frac{I_2}{\Delta}, \quad (6.15)$$

де

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \quad (6.16)$$

одержуємо:

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{кл}}{\Delta^2}, \quad (6.17)$$

де

$$r_c = \rho_c \cdot \frac{l_c}{q_c} \cdot \kappa_r; \quad (6.18)$$

$$r_{кл} = \rho_{кл} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл,ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}}. \quad (6.19)$$

В цих виразах l_c - повна довжина стрижня, рівна відстані між замикаючими кільцями, м;

$D_{кл,ср}$ - середній діаметр замикаючих кілець, м (див. рис. 4.1):

$$D_{кл,ср} = D_2 - b_{кл}; \quad (6.20)$$

q_c - перетин стрижня, m^2 ;

k_r - коефіцієнт збільшення активного опору стрижня від дії ефекту витіснення струму; при розрахунку робочих режимів в межах змінення ковзання від холостого ходу до номінального для всіх роторів приймають $k_r=1$;

$q_{кл}$ — площа поперечного перетину замикаючого кільця, м^2 ;

ρ_c і $\rho_{кл}$ - відповідно питомі опори матеріалу стрижня і замикаючих кілець, Ом·м, при розрахунковій температурі.

Опір r_2 для подальших розрахунків повинен бути приведений до числа витків первинної обмотки. Вираз коефіцієнта приведення для опору фази короткозамкнутого ротора отримують при : $m_2 = Z_2$; $w_2 = 1/2$; $\kappa_{o\delta 2} = 1$ і врахуванні скосу пазів:

$$\gamma_{12} = 4 \cdot m_1 \frac{(w_1 \cdot \kappa_{o\delta 1})^2}{Z_2 \cdot \kappa_{ск}^2}, \quad (6.21)$$

де $\kappa_{ск}$ розраховується за формулою (4.4).

Приведене значення активного опору фази обмотки короткозамкнутого ротора:

$$r_2' = r_2 \cdot \gamma_{12}. \quad (6.22)$$

6.3. Індуктивний опір розсіювання обмотки статора асинхронного двигуна

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора асинхронного двигуна:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_s'}{p \cdot q} (\lambda_n + \lambda_{л} + \lambda_o). \quad (6.23)$$

Коефіцієнти магнітної провідності пазового розсіювання λ_n визначаються залежно від конфігурації пазів по формулах таблиці 6.3 (по рис.6.3).

В цих формулах значення коефіцієнтів κ_β і κ'_β залежать від скорочення кроку обмотки β , що визначається по розрахунковому кроку обмотки:

Таблиця 6.3. Розрахункові формули для визначення коефіцієнтів магнітної провідності пазового розсіювання обмоток статора

Рис.	Тип обмотки	Розрахункові формули
6.3. а	Двошарова	$\frac{h_2 - h_0}{3b_n} \cdot \kappa_\beta + \frac{h_\kappa}{b_n} \cdot \kappa'_\beta + \frac{h_0}{4b_n}$
	Одношарова	$\frac{h_2}{3b_n} + \frac{h_\kappa}{b_n}$
6.3. б	Двошарова	$\frac{h_2 - h_0}{3b_n} \cdot \kappa_\beta + \left(\frac{h_1}{b_n} + \frac{3h_\kappa}{b_n + 2b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \cdot \kappa'_\beta + \frac{h_0}{4b_n}$
6.3. в, г, з	Двошарова і одношарова	$\frac{h_2}{3b_1} \cdot \kappa_\beta + \left(0,785 - \frac{b_{uu}}{2b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \cdot \kappa'_\beta$
6.3. д, е, і	Двошарова і одношарова	$\frac{h_2}{3b_1} \cdot \kappa_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_\kappa}{b_1 + 2b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \cdot \kappa'_\beta$
6.3. ж	Двошарова	$\frac{h_2 - h_0}{3b_n} \cdot \kappa_\beta + \left(\frac{h_1}{b_n} + \frac{3h_\kappa}{b_n + 2b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \cdot \kappa'_\beta + \frac{h_0}{4b_n}$

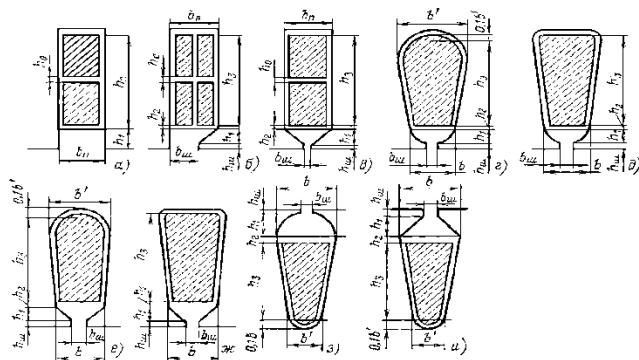


Рис. 6.3. До розрахунку магнітної провідності пазового розсіювання фазних обмоток: а-е - обмотки статора; ж-і – обмотки фазного ротора

- при $\beta = 1$: $\kappa_{\beta} = \kappa'_{\beta} = 1$; (6.24)

- при обмотці зі скороченням $\frac{2}{3} \leq \beta \leq 1$:
 $\kappa'_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3\beta)$ (6.25);

- при обмотці зі скороченням $\frac{1}{3} \leq \beta \leq \frac{2}{3}$:
 $\kappa'_{\beta} = 0,25 \cdot (6\beta - 1)$. (6.26)

Коефіцієнт $\kappa_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3\kappa'_{\beta})$. (6.27)

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання λ_l визначається за формулою:

$$\lambda_l = 0,34 \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_l - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau). \quad (6.28)$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання визначають по формулі:

$$\lambda_{ol} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot \kappa_{\delta}} \cdot \xi. \quad (6.29)$$

Значення ξ знаходять таким чином:

- при відкритих пазах статора і відсутності скосу пазів статора або

ротора $\xi = \left(2 \cdot \frac{t_2}{t_1} - \frac{t_1}{t_2} \cdot \Delta_z \right) \cdot \kappa_{\beta} - \kappa_{obl}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2$; (6.30)

- при напівзакритих або напіввідкритих пазах статора з урахуванням скосу

пазів: $\xi = 2 \cdot \kappa_{ck}' \cdot \kappa_{\beta} - \kappa_{obl}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ck}^2)$ (6.31)

де: t_1 і t_2 — зубцеві розподіли статора і ротора;

Δ_z визначають по кривій рис. 6.4,а;

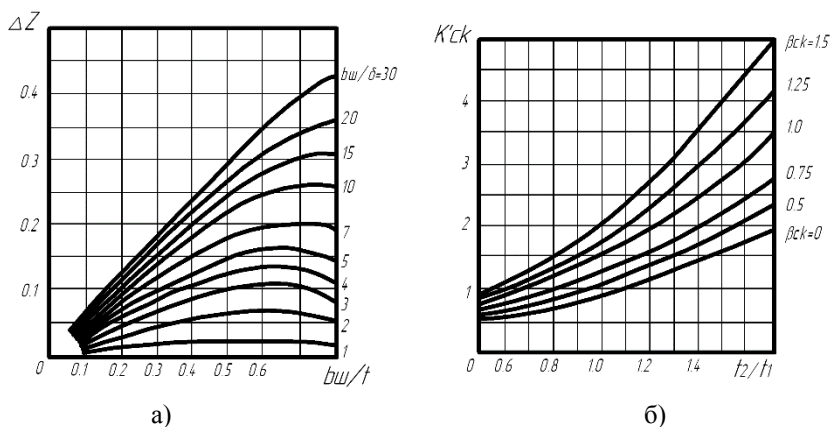


Рис.6.4. Коефіцієнти до розрахунку провідності диференційного розсіювання: а – коефіцієнт Δ_Z в залежності від розмірних співвідношень b_w/t і b_w/δ ; б - коефіцієнт κ'_{ck} в залежності від співвідношень t_2/t_1 і відносного скосу пазів β_{ck} .

$\beta_{ck} = b_{ck}/t_2$ - коефіцієнт скосу, що виражений в частках зубцевого розподілу ротора. За відсутності скосу пазів $b_{ck}=0$;

κ'_{ck} визначають по кривих рис. 6-4,б залежно від t_2/t_1 і β_{ck} (за відсутності скосу пазів - по кривій, що відповідає $\beta_{ck}=0$).

6.4. Індуктивний опір обмотки короткозамкнутого ротора

Індуктивний опір обмотки короткозамкнутого ротора визначають по формулі:

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l'_\delta \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_n + \lambda_{\lambda} + \lambda_o). \quad (6.32)$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки короткозамкнутого ротора розраховують по приведеним в табл. 6.4 формулам залежно від конфігурації паза ротора на рис. 6.5.

Таблиця 6.4. Розрахункові формули для визначення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання короткозамкнутих роторів

Рисунок	Розрахункові формули
6.5, а	$\left[\frac{h_0}{3b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{uu}}{2b_1} \right] \cdot \kappa_D + \frac{h_{uu}}{b_{uu}}$
6.5, б	$\left(\frac{h_0}{3b_n} + \frac{3h_2}{b_n + 2b_{uu}} \right) \cdot \kappa_D + \frac{h_{uu}}{b_{uu}}$
6.5, в	$\frac{h_0}{3b_n} \cdot \kappa_D + \frac{h_{uu}}{b_{uu}}$
6.5, г	$\left[\frac{h_0}{3b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{uu}}{2b_1} \right] \cdot \kappa_D + \frac{h_{uu}}{b_{uu}}$
6.5, д	$\left(0,785 - \frac{b_{uu}}{2d_n} \right) \cdot \kappa_D + \frac{h_{uu}}{b_{uu}}$

Примітка: 1. Для нормального режиму $\kappa_D = 1$.

2. При закритих пазах ротора будь-якої конфігурації (рис.6.4,а-д) в розрахункових формулах табл. 6.4 потрібно при шліцах по рис.6.4, е складові

h_{uu} / b_{uu} замінити на $0,3 + 1,12 \frac{h_{uu}'}{I_2} \cdot 10^6$; по рис 6.4, ж – на $\frac{h_{uu}}{b_{uu}} + 1,12 \frac{h_{uu}'}{I_2} \cdot 10^6$,

де h_{uu}' - товщина перемички над пазом, м; I_2 – струм ротора, А.

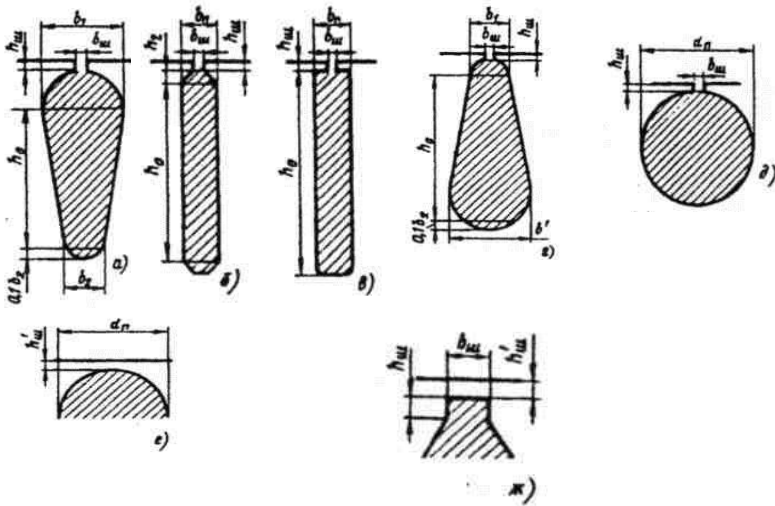


Рис. 6.5. До розрахунку магнітної провідності пазів ротора.

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки короткозамкнутого ротора:

$$\lambda_{o2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot \kappa_\delta} \cdot \xi, \quad (6.33)$$

де

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2}. \quad (6.34)$$

При великому числі пазів ротора, що доводяться на пару полюсів, $\frac{Z_2}{p} \geq 10$ без помітної погрішності можна прийняти $\xi = 1 - \Delta_z$.

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання розраховують залежно від розмірів і розташування замикаючих кілець короткозамкнутої обмотки по наступних формулах:

- в роторах з литими обмотками при замикаючих кільцях, що прилягають до торців осердя ротора (див. рис. 4.1), використовують формулу :

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср.}}{Z_2 \cdot l_{\delta}' \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл.ср.}}{2 \cdot b_{кл} + h_{кл}} ; \quad (6.35)$$

- якщо замикаючі кільця відставлені від торців осердя ротора (див. рис. 4.1):

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср.}}{Z_2 \cdot l_{\delta}' \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл.ср.}}{2 \cdot (h_{кл} + b_{кл})} . \quad (6.36)$$

В цих формулах $D_{кл.ср.}$ - середній діаметр замикаючих кілець по (4.11) ;

Δ - коефіцієнт приведення струмів в кільці до струму в стержні: $h_{кл}$ і $b_{кл}$ - середні висота і ширина кілець.

Приведений до числа витків первинної обмотки індуктивний опір обмотки короткозамкнутого ротора:

$$x_2' = x_2 \cdot \gamma_{12} . \quad (6.37)$$

Опори r_{12} і x_{12} з достатньою для звичайних розрахунків точністю визначають по наступних формулах:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн.}}{m \cdot I_{\mu}^2} ; \quad (6.38)$$

$$x_{12} = \frac{U_{1н}}{I_{\mu}} - x_1 . \quad (6.39)$$

6.5. Відносні значення параметрів

Для зручності зіставлення параметрів окремих машин і спрощення розрахунку характеристик параметри асинхронних машин виражають у відносних одиницях, приймаючи за базисні значення номінальну фазну напругу і номінальний фазний струм статора.

Значення параметрів, що виражені у відносних одиницях, відзначаються зірочкою:

$$\begin{aligned}
 x_{1*} &= x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}; & r_{1*} &= r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}; \\
 x_{12*} &= x_{12} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}; & r_{12*} &= r_{12} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}; \\
 x_{2*} &= x_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}; & r_{2*} &= r_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}.
 \end{aligned}
 \tag{6.40}$$

Відносні значення одних і тих же параметрів схеми заміщення різних асинхронних двигунів нормального виконання незначно відрізняються один від одного.

Так, відносні значення індуктивних опорів розсіювання обмотки статора і приведенного опору обмотки ротора переважно знаходяться в межах $x_{1*} = 0,08-0,14$ і $x_{2*}' = 0,1-0,16$.

Відносні значення опору взаємної індукції, як правило, в 30—40 разів більше, ніж x_{1*} . Звичайно $x_{12*} = 2-4$.

Відносні значення активних опорів обмотки статора і приведенного опору обмотки ротора близькі один до одного, і, звичайно, складають декілька сотих часток $r_{1*} \approx r_{2*}' \approx 0,02-0,03$, лише в машинах малої потужності їх значення дещо збільшуються. Опір r_{12*} , звичайно, складає 0,05—0,2. Тільки в двигунах великої потужності його значення може перевищувати вказані межі.

7. РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

Втрати в асинхронних машинах підрозділяють на втрати в сталі (основні і додаткові), електричні втрати, вентиляційні, механічні і додаткові втрати при навантаженні.

Основні втрати в сталі в асинхронних двигунах розраховують тільки в осерді статора, оскільки частота перемагнічування ротора, $f_2 = sf_1$ в режимах, що близькі до номінального, дуже мала і втрати в сталі ротора навіть при великих індукціях незначні. Основні втрати в сталі статорів асинхронних машин визначають по наступній формулі:

$$P_{cm.och} = \rho_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (\kappa_{da} \cdot B_a^2 \cdot m_a + \kappa_{dz} \cdot B_{z.cp}^2 \cdot m_{z1}), \quad (7.1)$$

де β — показник ступеня ;

$\rho_{1,0/50}$ — питомі втрати, Вт/кг, приймаються по таблиці 7.1;

k_{da} і k_{dz} — коефіцієнти, що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілу потоку по перетинах ділянок магнітопровода і технологічних чинників. Для машин потужністю менше 250 кВт приблизно можна прийняти $k_{da}=1.6$ і $k_{dz}=1.8$; для машин більшої потужності $k_{da}=1,4$ і $k_{dz}=1,7$.

B_a і $B_{z.cp}$ — індукція в ярмі і середня індукція в зубцях статора, Тл;

m_a , m_{z1} — маса сталі ярма і зубців статора, кг:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c; \quad (7.2)$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1.cp} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c; \quad (7.3)$$

h_a — висота ярма статора, м:

$$h_a = 0,5 \cdot (D_a - D) - h_{n1}; \quad (7.4)$$

h_{z1} - розрахункова висота зубця статора, м;

$b_{z1.cp}$ - середня ширина зубця статора, м;

$$b_{z1.cp} = \frac{b_{z1.max} + b_{z1.min}}{2}; \quad (7.5)$$

γ_c - питома маса сталі; у розрахунках приймають $\gamma_c = 7,6 \cdot 10^3$ кг/м³

Таблиця 7.1- Питомі втрати в сталі асинхронних двигунів і значення β при товщині листів 0,5 мм

Марка сталі	$p_{1.0/50}$, Вт/кг	β
2013, 2011, 2211	2,5-2,6	1,5
2312	1,75	1,4

Додаткові втрати в сталі, що виникають при холостому ході, підрозділяють на поверхневі і пульсаційні втрати в сталі зубців.

Для визначення поверхневих втрат спочатку знаходять амплітуду пульсації індукції в повітряному зазорі над коронками зубців статора і ротора, Тл:

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} \cdot \kappa_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad (7.6)$$

Для зубців статора β_{01} залежить від відношення ширини шліца пазів ротора до повітряного зазора $\beta_{01} = f(b_{m2}/\delta)$; для зубців ротора— від відношення ширини шліца пазів статора до повітряного зазора $\beta_{02} = f(b_{m1}/\delta)$. Залежність $\beta_0 = f(b_m/\delta)$ приведена на рисунку 7.1.

Питомі поверхневі втрати:

- для статора

$$p_{no\sigma 1} = 0,5\kappa_{01} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_2 \cdot 10^3)^2; \quad (7.7)$$

- для ротора

$$p_{no\sigma 2} = 0,5\kappa_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2. \quad (7.8)$$

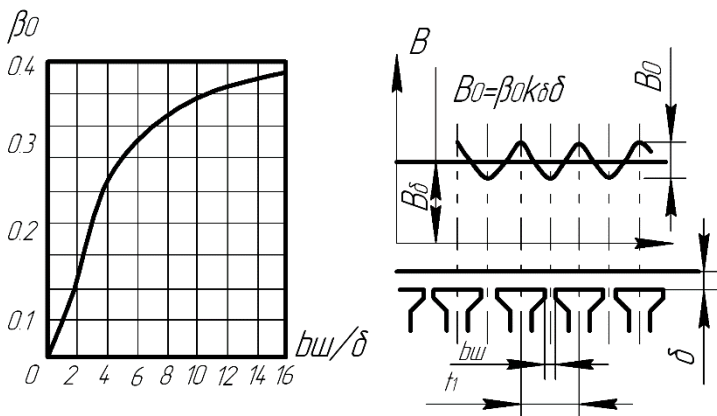


Рис. 7.1. До розрахунку поверхневих втрат в асинхронній машині.

a — залежність $\beta_0 = f(b_w/\delta)$;

b — пульсації індукції в повітряному зазорі.

де: $k_{01(2)}$ - коефіцієнт, що враховує вплив обробки поверхні голівок зубців статора (ротора) на питомі втрати; якщо поверхня не обробляється (двигуни потужністю до 160 кВт), то $k_{01} = 1,4 \div 1,8$, при шліфованих поверхнях (зовнішня поверхня роторів машин середньої і великої потужності, і внутрішня поверхня статора двигунів $P_2 > 160$ кВт) $k_{01(2)} = 1,7 \div 2,0$;

$n = n_c \cdot (1-s) \approx n_c$ - частота обертання двигуна, об/хв.

Повні поверхневі втрати статора, Вт,

$$P_{\text{пов1}} = \rho_{\text{пов1}} \cdot (t_1 - b_{\text{ш1}}) \cdot Z_1 \cdot l_{\text{ст1}}. \quad (7.9)$$

Повні поверхневі втрати ротора, Вт,

$$P_{\text{пов2}} = \rho_{\text{пов2}} \cdot (t_2 - b_{\text{ш2}}) \cdot Z_2 \cdot l_{\text{ст2}}. \quad (7.10)$$

Для визначення пульсаційних втрат спочатку знаходиться амплітуда пульсацій індукції в середньому перетині зубців $B_{\text{пуль}}$, Тл:

- для зубців статора

$$B_{\text{пуль}} \approx \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2t_1} \cdot B_{\text{з1cp}}; \quad (7.11)$$

- для зубців ротора

$$B_{nyl2} \approx \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2t_2} \cdot B_{z2cp}, \quad (7.12)$$

де: B_{z1cp} і B_{z2cp} - середні індукції в зубцях статора і ротора, Тл;

$$\gamma_1 = \frac{(b_{u1} / \delta)^2}{5 + b_{u1} / \delta} \quad (7.13)$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{u2} / \delta)^2}{5 + b_{u2} / \delta} \quad (7.14)$$

При відкритих пазах на статорі або на роторі при визначенні γ_1 і γ_2 в (7.13) та (7.14) замість b_{u1} або b_{u2} підставляють розрахункову ширину розкриття паза, рівну

$$b_{u1(2)}' = \frac{b_{u1(2)}}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5t_{1(2)}}{t_{1(2)} \cdot b_{u1(2)} + \chi_\delta} \right). \quad (7.15)$$

Значення коефіцієнта χ_δ залежно від відношення b_{π}/δ для відкритих пазів приведені на рисунку 7.2.

Пульсаційні втрати в зубцях статора

$$P_{nyl1} \approx 0,11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{nyl1} \right)^2 \cdot m_{z1}. \quad (7.16)$$

Пульсаційні втрати в зубцях ротора

$$P_{nyl2} \approx 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{nyl2} \right)^2 \cdot m_{z2}, \quad (7.17)$$

де: m_{z1} - маса сталі зубців статора, кг, визначається по (7.3);

m_{z2} - маса сталі зубців ротора, кг:

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2cp} \cdot Z_2 \cdot l_{cm2} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c, \quad (7.18)$$

де h_{z2} - розрахункова висота зубця ротора, м;

b_{z2cp} - середня ширина зубця ротора, м:

$$b_{z2cp} = (b_{z2max} + b_{z2min})/2. \quad (7.19)$$

Таким чином, додаткові втрати в сталі

$$P_{ст,дод} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2}; \quad (7.20)$$

і загальні втрати в сталі асинхронних двигунів

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст,осн}} + P_{\text{ст,дод}} \quad (7.21)$$

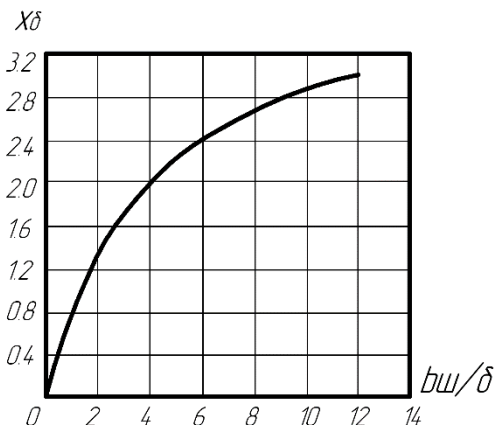


Рис.7.2. До визначення розрахункової ширини шліца паза.

Електричні втрати в асинхронних двигунах розраховують окремо в обмотках статорів і роторів.

Електричні втрати у всіх фазах обмотки статора, Вт

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1. \quad (7.22)$$

Електричні втрати в обмотці короткозамкнутого ротора, Вт

$$P_{e2} = m_2 \cdot \left(I_2' \right)^2 \cdot r_2'. \quad (7.23)$$

Механічні і вентиляційні втрати. Втрати на тертя в підшипниках і вентиляційні втрати в двигунах з радіальною системою вентиляції без радіальних вентиляційних каналів, з короткозамкнутим ротором і вентиляційними лопатками на замикаючих кільцях, Вт

$$P_{\text{мех}} \approx K_T \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10D)^3 \quad (7.24)$$

- для двигунів с $D_a \leq 0,25$ м: $K_T = 5$ при $2p = 2$; $K_T = 6$ при $2p \geq 4$
- для двигунів с $D_a > 0,25$ м: $K_T = 6$ при $2p = 2$; $K_T = 7$ при $2p \geq 4$.

В двигунах з зовнішнім обдувом ($0,1 \leq D_a \leq 0,5$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 \quad (7.25)$$

$K_T = 1$ для двигунів з $2p = 2$ і $K_T = 1,3 \cdot (1 - D_a)$ при $2p \geq 4$.

В двигунах з радіальною системою вентиляції середньої і великої потужності

$$P_{\text{мех}} = 1,2 \cdot 2p \cdot \tau^3 \cdot (n_k + 11) \cdot 10^3, \quad (7.26)$$

де n_k - число радіальних вентиляційних каналів.

В двигунах з аксіальною системою вентиляції

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10D_{\text{вент}})^3, \quad (7.27)$$

де $D_{\text{вент}}$ - зовнішній діаметр вентилятора, м; в більшості конструкцій можна прийняти $D_{\text{вент}} \approx D_a$;

$K_T = 2,9$ для двигунів з $D_a \leq 0,25$ м;

$K_T = 3,6$ для двигунів з $D_a = 0,25 - 0,5$ м.

В двигунах великої потужності ($0,5 < D_a < 0,9$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot (10D_a)^3 \quad (7.28)$$

Коефіцієнт K_T вибирається з таблиці 7.2.

Таблиця 7.2. До розрахунку механічних втрат двигунів великої потужності

$2p$	2	4	6	8	10	12
K_T	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Додаткові втрати при номінальному навантаженні приймаються, згідно ДЕСТу, рівними 0,5% номінальної потужності.

$$P_{\text{доодн}} = 0,005 \cdot P_{1н} = 0,005 \frac{P_{2н}}{\eta} \quad (7.29)$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}, \quad (7.30)$$

де $\sum P$ -сума всіх втрат у двигуні, Вт.

Струм холостого ходу двигуна

$$I_{x,x} = \sqrt{I_{x,x,a}^2 + I_{x,x,p}^2} . \quad (7.31)$$

При визначенні активної складової струму холостого ходу приймають, що втрати на тертя, вентиляцію і втрати в сталі при холостому ході двигуна такі ж, як і при номінальному режимі. При цій умові

$$I_{x,x,a} = \frac{P_{cm} + P_{мех} + P_{elx,x}}{m \cdot U_{1н}} . \quad (7.32)$$

Електричні втрати в статорі при холостому ході приблизно

$$P_{elx,x} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 . \quad (7.33)$$

Реактивна складова струму холостого ходу

$$I_{x,x,p} \approx I_{\mu*} . \quad (7.34)$$

Коефіцієнт потужності при холостому ході

$$\cos \varphi_{x,x} = \frac{I_{x,x,a}}{I_{x,x}} . \quad (7.35)$$

8. РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Робочими характеристиками асинхронних двигунів називають залежності P_1 , I_1 , $\cos \varphi$, η , $s = f(P_2)$.

Метод розрахунку робочих характеристик базується на системі рівнянь струмів і напруг асинхронної машини, якій відповідає Γ -подібна схема заміщення (рис.8.1) .

У АД при зміні струму від синхронного холостого ходу до номінального \dot{E}_1 змінюється незначно. Тому для отримання робочих характеристик коефіцієнт c_1 розраховують для синхронного холостого ходу і приймають його значення незмінним.

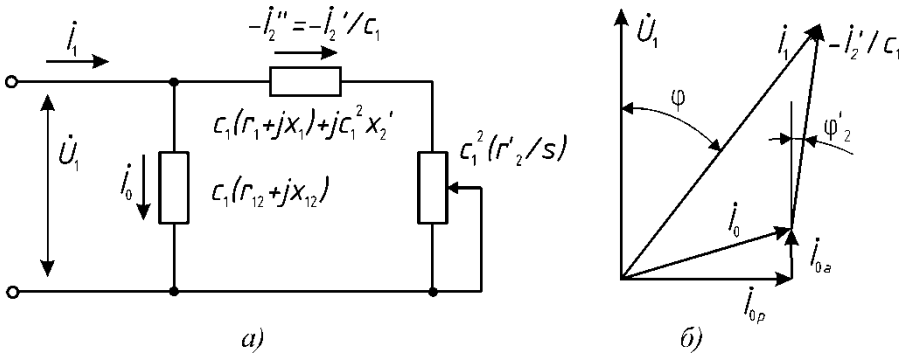


Рис. 8.1. Γ -подібна схема заміщення асинхронної машини (а) і відповідна їй векторна діаграма (б)

Розрахунок проводиться у такій послідовності. Визначають величини, що не залежать від ковзання:

– активна складова опору взаємодукції, Ом:

$$r_{12} \approx \frac{P_{\text{см.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} ; \quad (8.1)$$

– реактивна складова опору взаємодукції, Ом:

$$x_{12} = \frac{U_{1n}}{I_{\mu}} - x_1; \quad (8.2)$$

де x_1 – за (6.23);

– активна складова струму статора, А:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.очн} + 3I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3U_{1ном}}; \quad (8.3)$$

– значення комплексного коефіцієнта c_1 :

$$c_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_{12}} = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2}, \quad (8.4)$$

де c_{1a} – активна складова комплексного коефіцієнта:

$$c_{1a} = \frac{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}{(r_{12}^2 + x_{12}^2)}; \quad (8.5)$$

c_{1p} – реактивна складова комплексного коефіцієнта:

$$c_{1p} = \frac{x_1 \cdot r_{12} - r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2}; \quad (8.6)$$

– розрахункові величини:

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2; \quad (8.7)$$

$$b' = 2 \cdot c_{1a} \cdot c_{1p}; \quad (8.8)$$

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x_2'; \quad (8.9)$$

$$b = c_{1a} \cdot x_1 + c_{1p} \cdot r_1 + a' \cdot x_2'. \quad (8.10)$$

Вихідні дані до розрахунку необхідно звести до таблиці (див. табл. 8.1).

Задаючись рядом ковзань (7 точок, в тому числі і номінальне s_n) у діапазоні $s = (0, 2 \dots 1, 5) \cdot s_n$, визначають необхідні для будови характеристик величини:

– повний опір схеми заміщення АД, Ом:

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}; \quad (8.11)$$

R – активна складова опору схеми заміщення, Ом:

$$R_i = a + \frac{a' \cdot r'_2}{s_i}; \quad (8.12)$$

Таблиця 8.1. Вихідні данні до розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна з КЗ ротором

№ п/п	Величини	Позначення	Розмірність	Значення
1	Номінальна потужність, що віддається	$P_{ном}$	кВт	
2	Номінальна фазна напруга	$U_{1ном}$	В	
3	Номінальний струм статора	$I_{1ном}$	А	
4	Активна складова струму х.х.	I_{0a}	А	
5	Реактивна складова струму х.х.	$I_{0p} \approx I_{\mu}$	А	
6	Механічні втрати потужності	$P_{мех}$	кВт	
7	Повні втрати у сталі	$P_{ст}$	кВт	
8	Активний опір фази обмотки статора	r_1	Ом	
9	Індуктивний опір фази обмотки статора	x_1	Ом	
10	Приведений активний опір фази обмотки ротора	r_2'	Ом	
11	Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора	x_2'	Ом	
12	Коефіцієнт	c_1	-	
13	Розрахункова величина	a	-	
14	Розрахункова величина	b	-	
15	Розрахункова величина	a'	-	
16	Розрахункова величина	b'	-	

X – реактивна складова опору схеми заміщення, Ом:

$$X_i = b + \frac{b' \cdot r'_2}{s_i}; \quad (8.13)$$

– приведений струм ротора, А:

$$I_{2,s}'' = \frac{U_{1f}}{Z_s}; \quad (8.14)$$

– коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi'_{2,i} = \frac{R_i}{Z_i}; \quad (8.15)$$

– відношення:

$$\sin \varphi'_{2,i} = \frac{X_i}{Z_i}; \quad (8.16)$$

– активну складову струму статора, А:

$$I_{1a,i} = I_{o,a} + I_{2,i}'' \cdot \cos \varphi'_{2,i}; \quad (8.17)$$

– реактивну складову струму статора, А:

$$I_{1p,i} = I_{o,p} + I_{2,i}'' \cdot \sin \varphi'_{2,i}; \quad (8.18)$$

– фазний струм статора, А:

$$I_{1,i} = \sqrt{I_{1a,i}^2 + I_{1p,i}^2}; \quad (8.19)$$

– струм ротора з урахуванням комплексного коефіцієнту c_1 , А:

$$I_{2,i}' = c_1 \cdot I_{2,i}''; \quad (8.20)$$

– споживану двигуном потужність, кВт:

$$P_{1,i} = 3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1a,i} \cdot 10^{-3}; \quad (8.21)$$

– електричні втрати у всіх фазах обмотки статора, кВт:

$$P_{e1,i} = 3 \cdot I_{1,i}^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}; \quad (8.22)$$

– електромагнітну потужність двигуна, кВт:

$$P_{em,i} = P_{1,i} - P_{cm} - P_{e1,i}; \quad (8.23)$$

– електричні втрати у короткозамкненій обмотці ротора, кВт:

$$P_{e2,i} = s_i \cdot P_{em,i}; \quad (8.24)$$

– додаткові втрати, кВт:

$$P_{\partial,i} = 0,005 \cdot P_{1,i}; \quad (8.25)$$

– сумарні втрати у двигуні, кВт:

$$\sum P_i = P_{cm} + P_{mex} + P_{e1,i} + P_{e2,i} + P_{\partial,i}; \quad (8.26)$$

– потужність, що віддається двигуном, кВт:

$$P_{2,i} = P_{1,i} - \sum P_i; \quad (8.27)$$

– коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta_i = 1 - \frac{\sum P_i}{P_{1,i}}; \quad (8.28)$$

– коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos \varphi_i = \frac{I_{1a,i}}{I_{1,i}}; \quad (8.29)$$

Після закінчення розрахунку для прийнятих значень ковзання будуються характеристика $s = f(P_2)$, за якою уточнюються значення $s_{ном}$, що відповідає заданій номінальній потужності $P_{2ном}$ (див. рис. 8.2) і заповнюється останній стовпчик формуляру розрахунку (див. табл. 8.2).

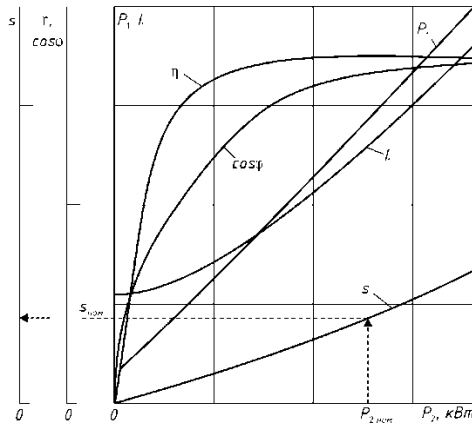


Рис. 8.2. Робочі характеристики двигуна з КЗ ротором

Таблиця 8.2. Результати розрахунку робочих характеристик АД

№ п/п	Розрахункова формула	Од. вим.	Ковзання s_i					
1	$a' \cdot r'_2 / s_i$	-						
2	$b' \cdot r'_2 / s_i$	-						
3	$R_i = a + a' \cdot r'_2 / s_i$	Ом						
4	$X_i = b + b' \cdot r'_2 / s_i$	Ом						
5	$Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$	Ом						
6	$I_{2,3}'' = U_{1f} / Z_3$	А						
7	$\cos \varphi'_{2,i} = R_i / Z_i$	в.о.						
8	$\sin \varphi'_{2,i} = X_i / Z_i$	в.о.						
9	$I_{1a,i} = I_{o,a} + I_{2,i}'' \cdot \cos \varphi'_{2,i}$	А						
10	$I_{1p,i} = I_{o,p} + I_{2,i}' \cdot \sin \varphi'_{2,i}$	А						
11	$I_{1i} = \sqrt{I_{1a,i}^2 + I_{1p,i}^2}$	А						
12	$I_{2,i}' = c_1 \cdot I_{2,i}''$	А						
13	$P_{li} = 3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1a,i} \cdot 10^{-3}$	кВт						
14	$P_{el,i} = 3 \cdot I_{li}^2 \cdot r_l \cdot 10^{-3}$	кВт						
15	$P_{em,i} = P_{1,i} - P_{cm} - P_{el,i}$	кВт						
16	$P_{e2,i} = s_i \cdot P_{em,i}$	кВт						
17	$P_{\partial,i} = 0,005 \cdot P_{1,i}$	кВт						
18	$\sum P_i = P_{cm} + P_{mex} + P_{el,i} + P_{e2,i} + P_{\partial,i}$	кВт						
19	$P_{2,i} = P_{1,i} - \sum P_i$	кВт						
20	$\eta_i = 1 - \sum P / P_{1,i}$	в.о.						

21	$\cos \varphi_i = I_{1a,i} / I_{1i}$	в.о.							
----	--------------------------------------	------	--	--	--	--	--	--	--

9. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Пускові властивості АД характеризуються початковим пусковим і максимальним моментом та початковим пусковим струмом. У двигунах з фазними роторами початковий момент і пусковий струм визначається опором пускового реостата. У двигунах з КЗ роторами значення моментів і початкового струму залежать від співвідношення параметрів.

У табл. 9.1 приведені допустимі відносні значення моментів і початкового пускового струму двигунів з КЗ ротором серії 4А. Спроекована заново асинхронна машина на базі серії 4А повинна мати пускові характеристики, що задовольняють цим вимогам.

При проектуванні доцільно розраховувати повні пускові характеристики, тобто залежності $M_* = f(s)$ і $I_* = f(s)$ для всього діапазону зміни ковзання від $s = 1$ до $s = 0,1$.

Таблиця 9.1. Кратність початкових пускових моментів M_{n*} і струмів I_{n*} асинхронних двигунів з КЗ ротором

виконання	2p	Висота осі обертання h, мм					
		≤132		160 - 250		≥ 280	
		M_{n*}	I_{n*}	M_{n*}	I_{n*}	M_{n*}	I_{n*}
IP44	2	1,7 – 2,0	6,5 – 7,5	1,2 – 1,4	7,0 – 7,5	1,0 – 1,2	6,5 – 7,0
	4	2,0 – 2,2	5,0 – 7,5	1,2 – 1,4	6,5 – 7,5	1,2 – 1,3	5,5 – 7,0
	6	2,0 – 2,2	4,0 – 6,5	1,2 – 1,3	5,0 – 6,5	1,4	5,5 – 6,5
	8	1,6 – 1,9	4,0 – 5,5	1,2 – 1,4	5,5 – 6,0	1,2	5,5 – 6,5
	10	–	–	1,2	6,0	1,0	6,0
	12	–	–	–	–	1,0	6,0
IP23	2	–	–	1,2 – 1,3	7,0	1,0 – 1,2	6,5 – 7,0
	4	–	–	1,2 – 1,3	6,5	1,0 – 1,2	6,0 – 7,0
	6	–	–	1,2	6,0 – 7,0	1,2	6,0
	8	–	–	1,2 – 1,3	5,5 – 6,0	1,2	5,0 – 5,5

	10	—	—	—	—	1,0	5,5
	12	—	—	—	—	1,0	5,5

Розрахунок пускових характеристик АД проводиться у два етапи:

- 1) розрахунок струмів із врахуванням впливу зміни параметрів під впливом ефекту витіснення струму;
- 2) розрахунок струмів у пусковому режимі АД з врахуванням впливу ефекту витіснення струму.

9.1. Розрахунок струмів із врахуванням впливу зміни параметрів під впливом ефекту витіснення струму

"Приведена висота стержня" (при литій алюмінієвій обмотці ротора і розрахунковій температурі $\nu_{роз} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$):

$$\xi_i = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_i} ; \quad (9.1)$$

де h_c - висота стержня у пазу, м:

$$h_c = h_n - (h_{ui} + h'_{ui}) . \quad (9.2)$$

Для ξ по рис. 9.1 та 9.2 визначається функції φ_i і φ'_i відповідно.

Глибина проникнення струму в стержень

$$h_{r,i} = \frac{h_c}{1 + \varphi_i} . \quad (9.3)$$

Коефіцієнт $k_{r,i}$ визначають по відношенню площ всього перетину стержня і перетину, обмеженого висотою $h_{r,i}$, тобто:

- для прямокутних стержнів (рис. 9.3, а):

$$k_{r,i} = \frac{q_c}{q_{r,i}} = \frac{h_c}{h_{r,i}} = 1 + \varphi_i ; \quad (9.4)$$

- для круглих стержнів (рис. 9.3, б)

$$k_{r,i} = \frac{q_c}{q_{r,i}} = 1 + \varphi_{кр,i} ; \quad (9.5)$$

- для грушеподібних стержнів (рис. 9.3, в)

$$k_{r,i} = \frac{q_c}{q_{r,i}} ;$$

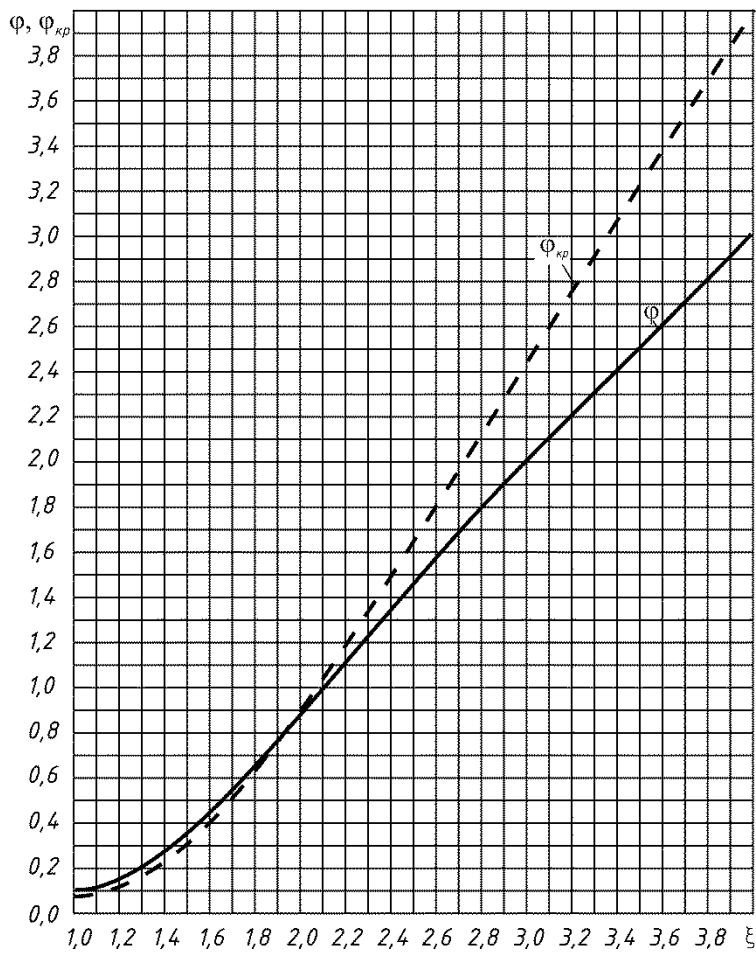


Рис. 9.1. Криві φ і $\varphi_{кр}$ у функції "приведеної висоти" ξ ($\varphi = 1 - \xi$ при $\xi > 4$ і $\varphi \approx 0,089 \cdot \xi^4$ при $\xi < 1$)

де $q_{r,i}$ - площа стержня, обмежена висотою $h_{r,i}$, при $\frac{b_1}{2} \leq h_r \leq h_1 + \frac{b_1}{2}$:

$$q_{r,i} = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_{r,i}}{2} \cdot \left(h_{r,i} - \frac{b_1}{2} \right); \quad (9.6)$$

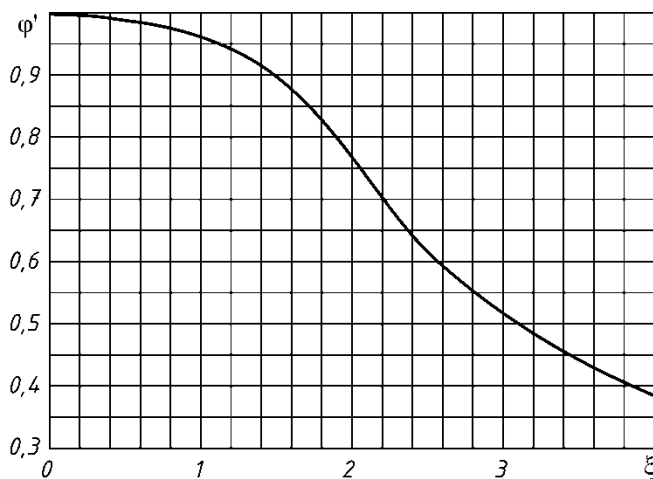


Рис. 9.2. Залежність φ' від "приведеної висоти" ξ при $\xi > 4$ $\varphi' = 1,5\xi$

де b_r - діаметр стержня (див. рис. 9.3):

$$b_{r,i} = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_{r,i} - \frac{b_1}{2} \right); \quad (9.7)$$

якщо $h_r < \frac{b_1}{2}$, то

$$q_{r,i} = \frac{\pi \cdot b_1^2}{4(\varphi_{кр,i} + 1)}, \quad (9.8)$$

- для трапецеїдальних стержнів з вузькою верхньою частиною (рис. 9.3, з)

$$k_{r,i} = q_c / q_{r,i} \quad (9.9)$$

q_c - визначають за (4.16), $q_{r,i}$ при $h_r \leq \frac{b_1}{2}$ визначають по (9.8) і при $h_r \geq \frac{b_1}{2}$ по (9.6), при цьому

$$b_{r,i} = b_1 + \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_{r,i} - \frac{b_1}{2} \right); \quad (9.10)$$

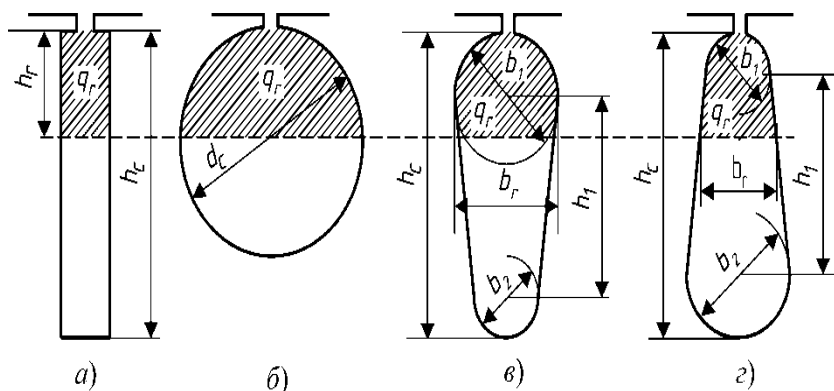


Рис. 9.3. До розрахунку K_r у стержнях різної конфігурації:

h_r – розрахункова глибина проникнення струму

якщо $h_r > h_1 + \frac{b_1}{2}$, то приймають $q_{r,i} \approx q_c$ і $k_r = 1$.

Коефіцієнт загального збільшення опору фази ротора під впливом ефекту витіснення струму:

$$K_{R,i} = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_{r,i} - 1). \quad (9.11)$$

Для прямокутних стержнів цей вираз матиме вигляд:

$$K_{R.i} = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot \varphi_i. \quad (9.12)$$

Для роторів без радіальних вентиляційних каналів з литою обмоткою (з прилягаючими замикаючими кільцями) у (9.11) та (9.12) $r'_c = r_c$.

Для роторів з радіальними вентиляційними каналами і роторів з відставленими замикаючими кільцями

$$r'_c = r_c \frac{l_c - n_\kappa \cdot b_\kappa}{l_2}. \quad (9.13)$$

Приведені опори обмотки ротора з врахуванням дії ефекту витіснення струму:

- активний

$$r'_{2\xi,i} = K_{R.i} \cdot r'_2; \quad (9.14)$$

- індуктивний опір обмотки ротора:

$$x'_{2\xi,i} = K_{x.i} \cdot x'_2, \quad (9.15)$$

де K_x - коефіцієнт зміни індуктивного опору фази обмотки ротора від дії ефекту витіснення струму:

$$K_{x.i} = \frac{\Sigma \lambda_{n2\xi}}{\Sigma \lambda_2} = \frac{\lambda_{n2\xi,i} + \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2}}; \quad (9.16)$$

$\lambda_{n2\xi}$ - коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання КЗ ротора з врахуванням ефекту витіснення струму:

$$\lambda_{n2\xi,i} = \lambda_{n2} - \Delta \lambda_{n2\xi,i}; \quad (9.17)$$

$\Delta \lambda_{n2\xi}$ - коефіцієнт магнітної провідності ділянкипазу, зайнятого провідником з обмоткою

$$\Delta \lambda_{n2\xi,i} = \lambda'_{n2} \cdot (1 - k_{\partial i}), \quad (9.18)$$

(вираз для визначення λ'_{n2} у формулах табл. 6.3 є множником перед коефіцієнтом k_{∂}).

Пускові параметри:

- індуктивний опір взаємоіндукції

$$x_{12n} \approx x_{12} \frac{F_y}{F_\delta} = k_\mu \cdot x_{12}; \quad (9.19)$$

- коефіцієнт

$$c_{1n} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}}. \quad (9.20)$$

Опір правої вітки Γ -подібної схеми заміщення (рис.8.1):

$$Z_{\text{еімку.і}} = c_{1n} \cdot (R_{n.i} + jX_{n.i}), \quad (9.21)$$

де

- активна складова

$$R_{n.i} = r_1 + c_{1n} \cdot r'_{2\xi.i} / s_i; \quad (9.22)$$

- реактивна складова

$$X_{n.i} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi.i}. \quad (9.23)$$

Струм у обмотці ротора:

$$I'_{2n.i} = c_{1n} \cdot I'_2 = \frac{U_{1ном} \cdot c_{1n}}{|Z_{\text{еімку.і}}|} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{n.i}^2 + X_{n.i}^2}}. \quad (9.24)$$

Струм в обмотці статора:

$$I_{1n.i} = \frac{U_{1ном}}{|Z_{cx.i}|} = I'_{2n.i} \cdot \frac{\sqrt{R_{n.i}^2 + (X_{n.i} + x_{12n})^2}}{c_{1n} \cdot x_{12n}}. \quad (9.25)$$

Таблиця 9.2. Розрахунок струмів у пусковому режимі АД із врахуванням впливу ефекту витіснення струму

№ п/п	Розрахункова формула	Розмір- ність	Ковзання s_i					
			1,0	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{кр}$
1	$\xi_i = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_i}$	-						
2	$\varphi_i = \varphi(\xi_i)$	-						
3	$h_{ri} = \frac{h_c}{1 + \varphi_i}$	мм						

4	$k_{r,i} = q_c / q_{r,i}$	-						
5	$K_{R,i}$	-						
6	$r'_{2\xi,i} = K_{R,i} \cdot r'_2$	Ом						
7	$\lambda_{n2\xi,i} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2\xi,i}$	-						
8	$k_{\partial,i} = \varphi'(\xi_i)$	-						
9	$K_{x,i} = \Sigma\lambda_{n2\xi} / \Sigma\lambda_2$	-						
10	$x'_{2\xi,i} = x'_2 \cdot K_{x,i}$	Ом						
11	$R_{n,i} = r_1 + \frac{c_{1n} \cdot r'_{2\xi,i}}{s_i}$	Ом						
12	$X_{n,i} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi,i}$	Ом						
13	$I'_{2n,i} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{n,i}^2 + X_{n,i}^2}}$	А						
14	$I_{1n,i} = I'_{2n,i} \cdot \frac{\sqrt{R_{n,i}^2 + (X_{n,i} + x_{12n})^2}}{c_{1n} \cdot x_{12n}}$	А						

9.2. Розрахунок струмів і моменту у пусковому режимі АД із врахуванням впливу ефекту витіснення струму і насичення від полів розсіювання

Перед початком розрахунку необхідно задатися значенням кратності збільшення струму, зумовленої зменшенням індуктивного опору із-за насичення зубцевої зони:

$$k_{нас} = \frac{I_{нас}}{I}, \quad (9.26)$$

де I - струм, розрахований для даного режиму без врахування насичення;

$I_{нас}$ - струм у цьому ж режимі роботи машини при насиченні ділянок зубців полями розсіювання.

Орієнтовно для розрахунку пускових режимів приймають:
 $k_{nac} = 1,4-1,5$, якщо повний струм паза двигуна перевищує 2000-2500 А;
 $k_{nac} = 1,15-1,2$, якщо повний струм паза близький до 1000 А.

Для режиму максимального моменту – $k_{nac} = 1,1-1,2$.

Для двигунів з відкритими пазами слід задаватися меншими значеннями k_{nac} , при напівзакритих пазах – більшими.

Розрахунок проводиться у наступному порядку.
 Фіктивна індукція потоку розсіювання у повітряному зазорі, Тл:

$$B_{\Phi\delta,i} = \frac{F_{n.cp,i}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-6}, \quad (9.27)$$

де $F_{n.cp}$ - середня МРС, віднесена до одного паза обмотки статора:

$$F_{n.cp,i} = 0.7 \cdot \frac{k_{nac,i} \cdot I_1 \cdot u_{n1}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{o\beta 1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right), \quad (9.28)$$

k'_β - за (6.25); C_N - коефіцієнт:

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}}. \quad (9.29)$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання статора з врахуванням впливу насичення і витіснення струму:

$$\lambda_{n1nac,i} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1nac,i}, \quad (9.30)$$

де $\Delta\lambda_{n1nac}$ - зменшення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання статора:

- для відкритого пазу:

$$\Delta\lambda_{n1nac,i} = \frac{h_\kappa}{b_{uu}} \cdot \frac{c_{e1,i}}{b_{uu} + c_{e1,i}}; \quad (9.31)$$

- для напіввідкритого пазу:

$$\Delta\lambda_{n1nac,i} = \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \cdot \frac{c_{e1,i}}{b_{uu} + c_{e1,i}} + \frac{h_\kappa}{b_{uu} + b_n} \cdot \frac{c_{e1,i}}{b_{uu} + b_n + c_{e1,i}}; \quad (9.32)$$

- для напівзакритого пазу:

$$\Delta\lambda_{n1nac.i} = \frac{h_{ul} + 0,58h_k}{b_{ul}} \cdot \frac{c_{e1.i}}{1,5b_{ul} + c_{e1.i}}, \quad (9.33)$$

c_{e1} - значення додаткового еквівалентного розкриття пазів статора:

$$c_{e1.i} = (t_{z1} - b_{ul})(1 - \chi_{\delta.i}). \quad (9.34)$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання обмотки статора з врахуванням насичення ділянок зубців статора:

$$\lambda_{\phi1nac.i} = \lambda_{\phi1} \cdot \chi_{\delta.i}, \quad (9.35)$$

де χ_{δ} - коефіцієнт, приймають за кривою, представленою на рис. 9.5.

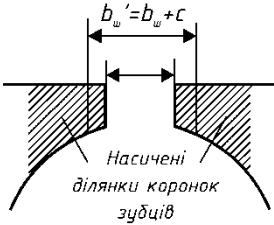


Рис. 9.4. Насичення ділянок коронок зубців потоком розсіювання

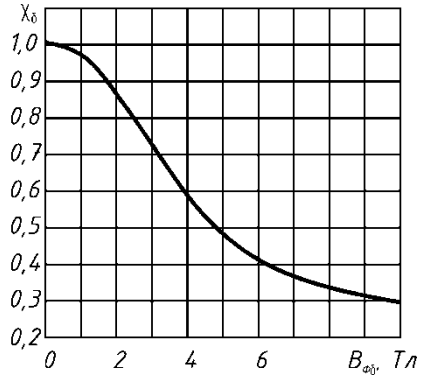


Рис. 9.5. Функція χ_{δ} у залежності від фіктивної індукції $B_{\phi\delta}$

Індуктивний опір фази обмотки статора з врахуванням впливу насичення:

$$x_{1nac.i} = x_1 \frac{\Sigma\lambda_{1nac}}{\Sigma\lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{n1nac.i} + \lambda_{\phi1nac.i} + \lambda_{\lambda1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{\phi1} + \lambda_{\lambda1}}. \quad (9.36)$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки ротора з врахуванням впливу насичення і витіснення струму:

$$\lambda_{n2\xi nac.i} = \lambda_{n2\xi.i} - \Delta\lambda_{n2nac.i}, \quad (9.37)$$

де $\Delta\lambda_{n2нас}$ - зменшення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання ротора для відкритих і закритих пазів (рис. 9.6: δ -жс):

$$\Delta\lambda_{n2нас.i} = \frac{h_{w2}}{b_{w2}} \cdot \frac{c_{e2.i}}{c_{e2.i} + b_{w2}}; \quad (9.38)$$

c_{e2} - значення додаткового еквівалентного розкриття пазів ротора:

$$c_{e2.i} = (t_{z2} - b_{w2})(1 - \chi_{\delta.i}). \quad (9.39)$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання ротора з урахуванням насичення:

$$\lambda_{\partial2нас.i} = \lambda_{\partial2} \cdot \chi_{\delta.i}. \quad (9.40)$$

Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора із урахуванням впливу витиснення струму:

$$x'_{2\xiнас.i} = x'_2 \frac{\Sigma\lambda_{2\xiнас}}{\Sigma\lambda_2} = x'_2 \frac{\lambda_{n2\xiнас.i} + \lambda_{\partial2нас.i} + \lambda_{л2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\partial2} + \lambda_{л2}}. \quad (9.41)$$

Визначаємо коефіцієнт

$$c_{1n.нас.i} = 1 + \frac{x_{1нас.i}}{x_{12n}}. \quad (9.42)$$

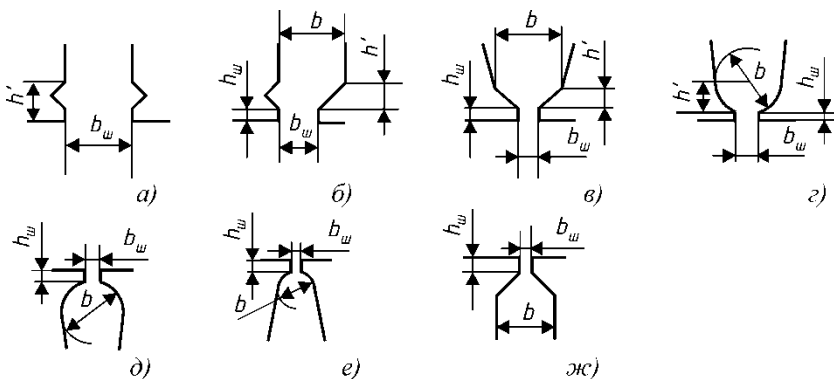


Рис. 9.6. До розрахунку впливу насичення потоком розсіювання на коефіцієнт магнітної провідності паза:

a -жс – різноманітні конфігурації пазів

Опір правої вітки Γ -подібної схеми заміщення при насиченні (рис.8.1):

$$Z_{\text{вітки.нас.}i} = c_{1n.\text{нас.}i} \cdot (R_{n.\text{нас.}i} + jX_{n.\text{нас.}i}), \quad (9.43)$$

де

- активна складова

$$R_{n.\text{нас.}i} = r_1 + c_{1n.\text{нас.}i} \cdot r'_{2\xi,i} / s_i; \quad (9.44)$$

- реактивна складова

$$X_{n.\text{нас.}i} = x_{1.\text{нас.}i} + c_{1n.\text{нас.}i} \cdot x'_{2\xi,i}. \quad (9.45)$$

Струм у обмотці ротора:

$$I'_{2.\text{нас.}i} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{n.\text{нас.}i}^2 + X_{n.\text{нас.}i}^2}}. \quad (9.46)$$

Струм в обмотці статора:

$$I_{1.\text{нас.}i} = I'_{2.\text{нас.}i} \cdot \frac{\sqrt{R_{n.\text{нас.}i}^2 + (X_{n.\text{нас.}i} + x_{12n})^2}}{c_{1n.\text{нас.}i} \cdot x_{12n}}. \quad (9.47)$$

Відносні значення, в.о.:

- пускового струму

$$I_{n^*.i} = \frac{I_{1.\text{нас.}i}}{I_{1н}}; \quad (9.48)$$

- пускового моменту

$$M_{n^*.i} = \left(\frac{I'_{2.\text{нас.}i}}{I'_{2н}} \right)^2 K_R \cdot \frac{s_n}{s_i}. \quad (9.49)$$

Дійсний коефіцієнт насичення

$$k'_{\text{нас.}i} = \frac{I_{1.\text{нас.}i}}{I_{1н.i}}, \quad (9.50)$$

необхідно порівняти з попередньо прийнятим $k_{\text{нас}}$, при розходженні більше 10-15% необхідно скоректувати значення $k_{\text{нас}}$ і повторити розрахунок для даного ковзання.

Критичне ковзання визначаємо після розрахунку всіх точок пускових характеристик по середнім значенням опорів $x_{1нас}$ і $x'_{2\xi нас}$, що відповідають ковзанню $s = 0.1-0.2$:

$$s_{кр} \approx \frac{r'_2}{\frac{x_{1нас}}{c_{1п.нас}} + x'_{2\xi нас}}, \quad (9.51)$$

де $x_{1нас.ср}$, $x'_{2нас.ср}$, $c_{1п.нас}$ - середні значення опорів, розраховані для точок ковзання 0.1-0.2.

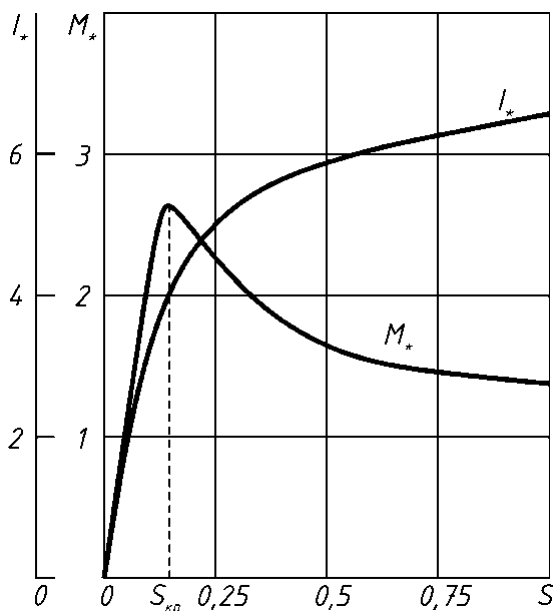


Рис. 9.7. Пускові характеристики асинхронного двигуна з КЗ ротором

Далі розраховуємо точки характеристик, що відповідають $s_{кр}$.
Результати розрахунку доцільно представити у вигляді табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Розрахунок струмів у пусковому режимі АД із врахуванням впливу ефекту витіснення струму

№ п/п	Розрахункова формула	Розмір-ність	Ковзання s_i					
			1,0	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{кр}$
1	$k_{нас.i}$	-						
2	$F_{n,cp,i} = 0.7 \frac{k_{нас.i} I_{1u_{n1}}}{a} \left(k'_\beta + k_{y1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А						
3	$B_{\Phi\delta,i} = F_{n,cp,i} \cdot 10^{-6} / 1.6 \cdot \delta \cdot C_N$	ТЛ						
4	$\chi_{\delta,i} = f(B_{\Phi\delta,i})$	-						
5	$c_{e1,i} = (t_{Z1} - b_{u1})(1 - \chi_{\delta,i})$	-						
6	$\lambda_{n1нас,i} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас,i}$	-						
7	$\lambda_{\partial1нас,i} = \chi_{\delta,i} \cdot \lambda_{\partial1}$	-						
8	$x_{1нас,i} = x_1 \frac{\lambda_{n1нас,i} + \lambda_{\partial1нас,i} + \lambda_{л1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{\partial1} + \lambda_{л1}}$	Ом						
9	$c_{1n,нас,i} = 1 + x_{1нас,i} / x_{12n}$	-						
10	$c_{e2,i} = (t_{z2} - b_{u2})(1 - \chi_{\delta,i})$	-						
11	$\lambda_{n2\xi,нас,i} = \lambda_{n2\xi,i} - \Delta\lambda_{n2нас}$	-						
12	$\lambda_{\partial2нас,i} = \chi_{\delta,i} \cdot \lambda_{\partial2}$	-						
13	$x'_{2\xi,нас,i} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xi,нас,i} + \lambda_{\partial2нас,i} + \lambda_{л2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\partial2} + \lambda_{л2}}$	Ом						
14	$R_{n,нас,i} = r_1 + c_{1n,нас,i} \cdot r'_{2\xi,i} / s_i$	Ом						
15	$X_{n\xi,нас,i} = x_1 + c_{1n,нас,i} \cdot x'_{2\xi,i}$	Ом						
16	$I'_{2нас,i} = U_{1n} / \sqrt{R_{n,нас,i}^2 + X_{n,нас,i}^2}$	А						
17	$I_{1нас,i} = \frac{I'_{2нас,i} \sqrt{R_{n,нас,i}^2 + (X_{n,нас,i} + x_{12n})^2}}{c_{1n,нас,i} \cdot x_{12n}}$	А						
18	$k'_{нас,i} = I_{1нас,i} / I_{1n,i}$	-						
19	$I_{n^*,i} = I_{1n,нас,i} / I_{1n}$	-						

20	$M_{n^*,i} = (I'_{2нас,i} / I'_{2н})^2 \cdot K_R \cdot (s_n / s_i)$	-						
----	---	---	--	--	--	--	--	--

10. ТЕПЛОВИЙ ТА ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ

Для оцінки теплового режиму двигуна використовують наближений метод теплового розрахунку, який базується на використанні середніх значень коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні і теплопровідності ізоляції в пазовій та лобовій частинах обмоток.

Розрахунок нагріву виконують, використовуючи значення втрат, що отримані для номінального режиму, але втрати в ізольованих обмотках статора і фазного ротора дещо збільшують, порівняно з розрахунковими, вважаючи, що обмотки можуть бути нагріті до максимально допустимої для прийнятого класу ізоляції температури: при класі нагрівостійкості ізоляції В – до 120 °С, при класі нагрівостійкості ізоляції F – до 140 °С і при класі нагрівостійкості ізоляції Н – до 165 °С. При цьому коефіцієнт збільшення втрат κ_ρ , порівняно з отриманими, для розрахункової температури складає: для обмоток з ізоляцією класу нагрівостійкості В $\kappa_\rho = \rho_{120} / \rho_{75} = 1,15$, для обмоток з ізоляцією класу нагрівостійкості F $\kappa_\rho = \rho_{140} / \rho_{115} = 1,07$ і для обмоток з ізоляцією класу нагрівостійкості Н $\kappa_\rho = \rho_{165} / \rho_{115} = 1,45$.

Електричні втрати в обмотці статора підрозділяються на втрати в пазовій частині $P'_{e,n1}$ і втрати в лобових частинах катушок $P'_{e,l1}$:

$$P'_{e,n1} = \kappa_\rho \cdot P_{e1} \frac{2l_1}{2l_{cp1}} \quad (10.1)$$

$$P'_{e,l1} = \kappa_\rho \cdot P_{e1} \frac{2l_{l1}}{2l_{cp1}} \quad (10.2)$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta g_{\text{нод}} = K \cdot \frac{P'_{e.n1} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} \quad (10.3)$$

де α_1 - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні (приймається по рис.10.1-10.2, в залежності від виконання машини);

K - коефіцієнт, який враховує, що частина втрат в осерді статора і в пазовій частині обмотки передається через станину безпосередньо в навколишнє середовище (знаходиться з таблиці 10.1).

Таблиця 10.1. Середні значення коефіцієнту K для асинхронних двигунів серії 4А

Виконання двигуна за способом захисту	Число полюсів двигуна $2p$					
	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

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора:

$$\Delta g_{i3.n1} = \frac{P'_{e.n1}}{Z_1 \cdot \Pi_{n1} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{i3.n1}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{екв}}} \right) \quad (10.4)$$

де Π_{n1} - розрахунковий периметр поперечного перерізу паза статора, що дорівнює:

- для напівзакритих трапецеїдальних пазів (см.рис.)

$$\Pi_{n1} = 2h_n + b_1 + b_2 \quad (10.5)$$

- для прямокутних відкритих та напіввідкритих пазів (см.рис.)

$$\Pi_{n1} = 2(h_n + b_n) \quad (10.6)$$

b_{i31} - одностороння товщина ізоляції в пазу; для всипної обмотки b_{i31} вибирається по відповідним таблицям; для обмоток з прямокутного проводу:

$$b_{i31} = 0,5(b_n - n_{el} \cdot b) \quad (10.7)$$

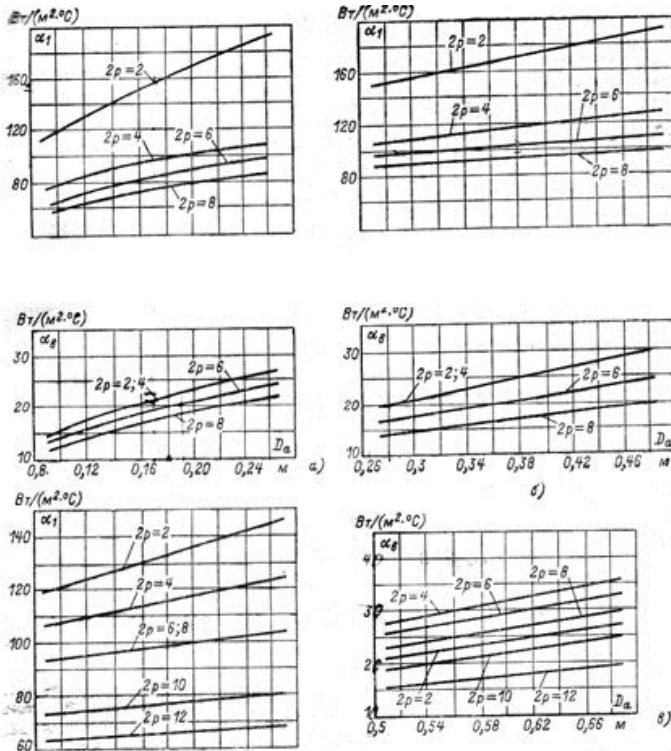


Рис.10.1. Середні значення коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні α_1 і підігріва повітря α_B для асинхронних двигунів виконання IP44
а) при $h < 160$ мм; б) при $h = 160 \dots 250$ мм; в) при $h \geq 280$ мм з ротором, що продувається

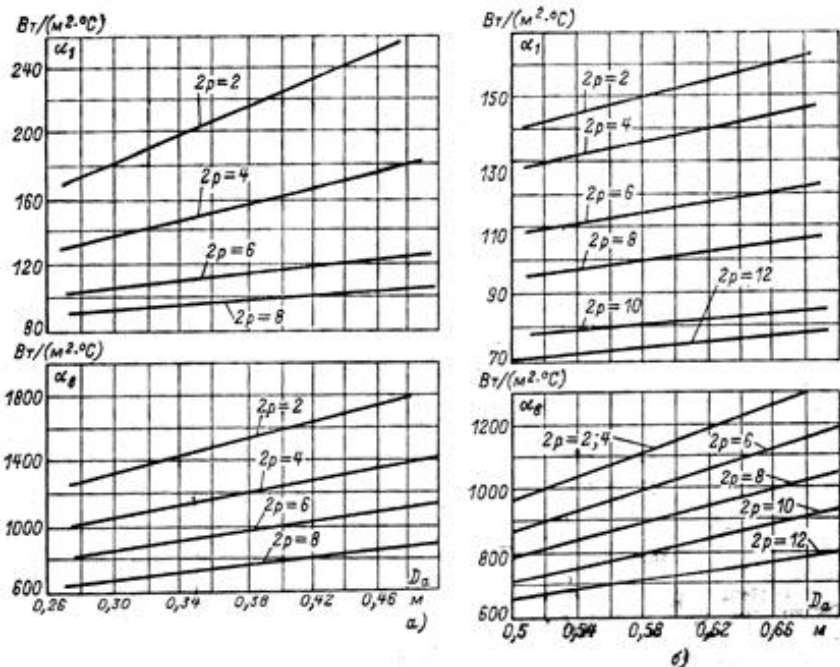


Рис.10.2. Середні значення коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні α_1 і підігріву повітря α_2 для асинхронних двигунів виконання IP23
а) при $h=160...250$ мм; б) при $h \geq 280$ мм

n_{el} і b – число і ширина неізолюваних елементарних провідників, що розміщені в одному шарі по ширині пазу;

$\lambda_{екв}$ - середня еквівалентна теплопровідність пазової ізоляції.

Для ізоляції класів нагрівостійкості В, F і Н: $\lambda_{екв} = 0,16 \frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$;

$\lambda'_{екв}$ - середнє значення коефіцієнту теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки всипної обмотки із емальованих провідників з врахуванням

нешільності прилягання провідників один до одного. Значення $\lambda'_{екв}$ по рис.

10.3; для обмоток з прямокутного проводу приймають $\frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda_{екв}} = 0$.

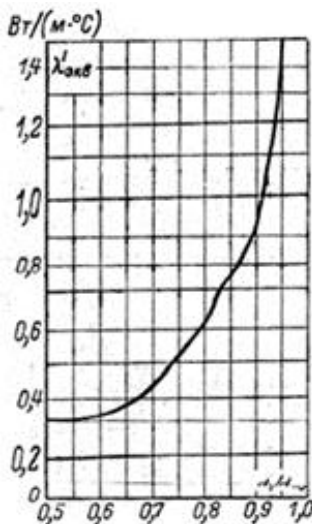


Рис.10.3. Середні значення коефіцієнтів теплопровідності $\lambda'_{екв}$ внутрішньої ізоляції котушок всипної обмотки із емальованого проводу.

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин, °C,

$$\Delta \vartheta_{из,л1} = \frac{P'_{e,л1}}{2Z_1 \cdot P_{л1} \cdot l_{л1}} \left(\frac{b_{из,л1}}{\lambda_{екв}} + \frac{h_{л1}}{12\lambda'_{екв}} \right) \quad (10.8)$$

де $P_{л1}$ - периметр умовної поверхні охолодження лобової частини однієї котушки; $P_{л1} \approx P_{н1}$;

$b_{из,л1}$ - одностороння товщина ізоляції лобової частини котушки. При відсутності ізоляції в лобових частинах $b_{из,л1} = 0$;

$\lambda'_{екв}$ - для всипної обмотки по рис. 6-62; для обмоток з прямокутного проводу приймають $\frac{h_{n1}}{12\lambda'_{екв}} = 0$.

Перевищення температури зовнішньої поверхні ізоляції лобових частин обмотки над температурою повітря всередині машини, °C,

$$\Delta \vartheta_{нов.л1} = \frac{K \cdot P'_{e.л1}}{2\pi \cdot D \cdot l_{ви.л1} \cdot \alpha_1} \quad (10.9)$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини, °C,

$$\Delta \vartheta'_1 = \frac{(\Delta \vartheta_{нов.л1} + \Delta \vartheta_{из.л1}) \cdot 2l_1}{l_{cp1}} + \frac{(\Delta \vartheta_{из.л1} + \Delta \vartheta_{нов.л1}) \cdot 2l_{л1}}{l_{cp1}} \quad (10.10)$$

Перевищення температури повітря всередині машини над температурою навколишнього середовища:

$$\Delta \vartheta_B = \frac{\Sigma P'_B}{S_{кор} \cdot \alpha_B} \quad (10.11)$$

де $\Sigma P'_B$ - сума втрат, що відводяться на повітря всередині двигуна, Вт;

α_B - коефіцієнт підігріву повітря, що враховує тепловіддаючу властивість поверхні корпусу та інтенсивність перемішування повітря всередині машини (рис. 6-59);

$S_{кор}$ - еквівалентна поверхня охолодження корпусу, м².

Для двигунів зі ступенем захисту IP23

$$\Sigma P'_B = \Sigma P' - (1 - K)(P'_{e.л1} + P_{ст.очн}) \quad (10.12)$$

де $\Sigma P' = \Sigma P + (\kappa_\rho - 1)(P_{e1} + P_{e2}) \quad (10.13)$

ΣP - сума всіх втрат в двигуні при номінальному режимі і розрахунковій температурі;

$$S_{кор} = \pi \cdot D_a \cdot (l_1 + l_{вил}) \quad (10.14)$$

Для двигунів зі ступенем захисту IP44

$$\Sigma P'_B = \Sigma P' - (1 - K)(P'_{ел1} + P_{ст.осн}) - 0,9P_{мех} \quad (10.15)$$

При розрахунках $S_{кор}$ враховують поверхню ребер станини:

$$s_{кор} = (\pi D_a + 8\Pi_p)(l_1 + 2l_{вил}) \quad (10.16)$$

де Π_p - умовний периметр поперечного перерізу ребер станини; значення Π_p може бути взятé наближено по кривій на рис. 10.4.

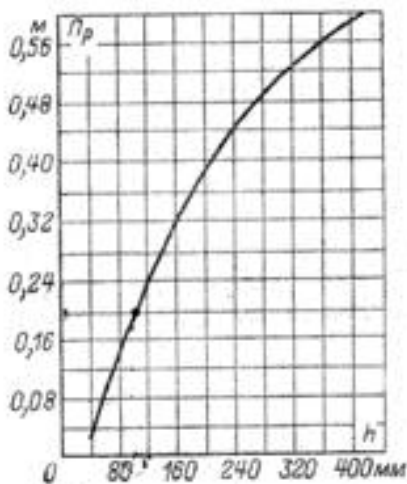


Рис.10.4. Середні значення периметра поперечного перерізу ребер асинхронних двигунів серії 4А.

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища, °С,

$$\Delta \mathcal{G}_1 = \Delta \mathcal{G}_1' + \Delta \mathcal{G}_{e1}' \quad (10.17)$$

Розрахунок вентиляції.

Вентиляційний розрахунок асинхронних двигунів, так само як і тепловий, на початковому етапі проектування, виконується наближеним методом. Метод заключається в співставленні витрати повітря, яка необхідна для охолодження двигуна, і витрати, яка може бути отримана при даній конструкції і розмірах двигуна.

Для двигунів, що спроектовані на базі серії 4А із ступенем захисту IP23, витрата повітря, яка необхідна для охолодження, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$Q_e = \frac{\sum P_e'}{1100 \cdot \Delta \mathcal{G}_e'} \quad (10.18)$$

де $\Delta \mathcal{G}_e'$ - перевищення температури повітря, що виходить з двигуна, над температурою вхідного повітря; приймається приблизно $\Delta \mathcal{G}_e' = 2\Delta \mathcal{G}_e$.

Витрата повітря, яка може бути отримана при даних розмірах двигуна, оцінюється за емпіричною формулою:

$$Q_e' = m \cdot (n_k \cdot b_k + 0,1) \cdot \frac{n}{100} \cdot D_a^2 \quad (10.19)$$

де n_k і b_k - число і ширина радіальних вентиляційних каналів, м;

n - частота обертання двигуна, об/хв;

m - коефіцієнт ($m = 2,6$ для двигуна з $2p=2$; $m = 3,15$ для двигуна з $2p \geq 4$).

Для двигунів із ступенем захисту IP44 витрата повітря, яка необхідна для охолодження, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$Q_e = \frac{k_m \sum P_e'}{1100 \Delta \mathcal{G}_e'} \quad (10.20)$$

де k_m - коефіцієнт, що враховує зміну умов охолодження по довжині поверхні корпусу, що обдувається зовнішнім вентилятором:

$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100} D_a} \quad (10.21)$$

Коефіцієнт $m = 2,6$ для двигуна з $2p=2$ при $h \leq 132$ мм і $m = 3,3$ при $h \geq 160$ мм; $m = 1,8$ для двигуна з $2p \geq 4$ при $h \leq 132$ мм і $m = 2,5$ при $h \geq 160$ мм.

Витрата повітря, що забезпечується зовнішнім вентилятором при конструктивному виконанні і розмірах, що прийняті в двигунах серії 4А, може бути приблизно визначена за формулою:

$$Q'_e = 0.6 D_a^3 \frac{n}{100} \quad (10.22)$$

Витрата повітря Q'_e повинна бути більшою ніж потрібно для охолодження машини $Q'_e > Q_e$.

Додаток А

Приклад титульного аркуша розрахунково-пояснювальної записки до курсового проекту

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

(повна назва кафедри, цуксової комісії)

КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

з курсу «Електричні машини»

(назва дисципліни)

на тему: «Розрахунок асинхронного двигуна з коротко замкнутим ротором»

Студента III курсу _____ групи
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(прізвище та ініціали)

Керівник доцент, к.т.н. Гарасьова Н.Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала _____
Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії

(підпис) Пасинов П.Г.
(прізвище та ініціали)

(підпис) Гарасьова Н.Ю.
(прізвище та ініціали)

(підпис) Козловський О.А.
(прізвище та ініціали)

м. Кропивницький– 20 __ рік

Додаток Б

Приклад завдання на курсовий проект

Центральноукраїнський національний технічний університет
(назва вищого навчального закладу)

Кафедра ЕТС та ЕМ
Дисципліна Електричні машини
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Курс _____ Група _____ Семестр _____

ЗАВДАННЯ

на курсовий проект (роботу) студента

(Прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема проекту (роботи) Розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором

- Строк здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____
- Вихідні дані до проекту (роботи) Номинальна потужність $P_n =$ кВт;
номинальна напруга $U = 220/380$ В; кількість пар полюсів $p =$; висота вісі обертуння (попередньо) $h =$ мм; довжина _____ ; виконання по способу захисту від впливу зовнішнього середовища _____

- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці) Вибір головних розмірів; розрахунок статора; вибір повітряного зазору; розрахунок ротору; розрахунок магнітного ланцюга; визначення параметрів робочого режиму; розрахунок витрат потужності; розрахунок робочих та пускових характеристик; теплової та вентиляційної розрахунки

- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____

- Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів курсового проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1.	Вибір головних розмірів		
2.	Розрахунок статора та повітряного зазору		
3.	Розрахунок ротору		
4.	Розрахунок магнітного ланцюга		
5.	Розрахунок параметрів робочого режиму		
6.	Розрахунок витрат		
7.	Розрахунок робочих характеристик		
8.	Розрахунок пускових характеристик		
9.	Тепловий та вентиляційний розрахунки		
10.	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини		
11.	Підготовка до захисту курсового проекту		

Студент _____

(підпис)

Керівник _____

(підпис)

_____ (Прізвище, ім'я, по батькові)

“ ____ ” _____ 20__ р.

ДОДАТОК В

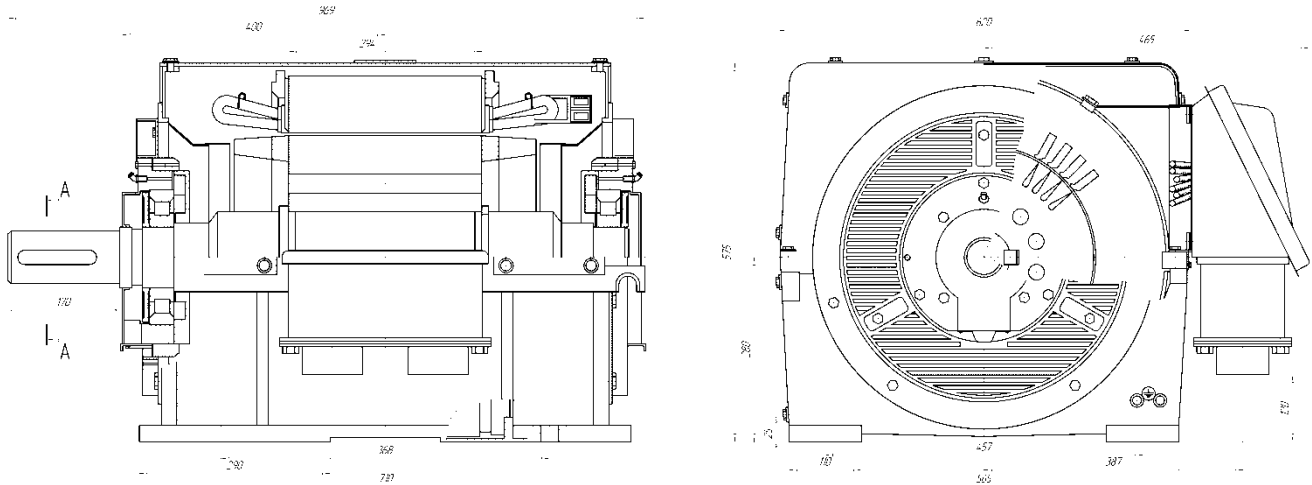


Рис. В.1. Загальний вид асинхронного двигуна серії 4А з висотою осі обертання
 $280 \leq h \leq 315$ мм; ступінь захисту IP23; ротор короткозамкнений

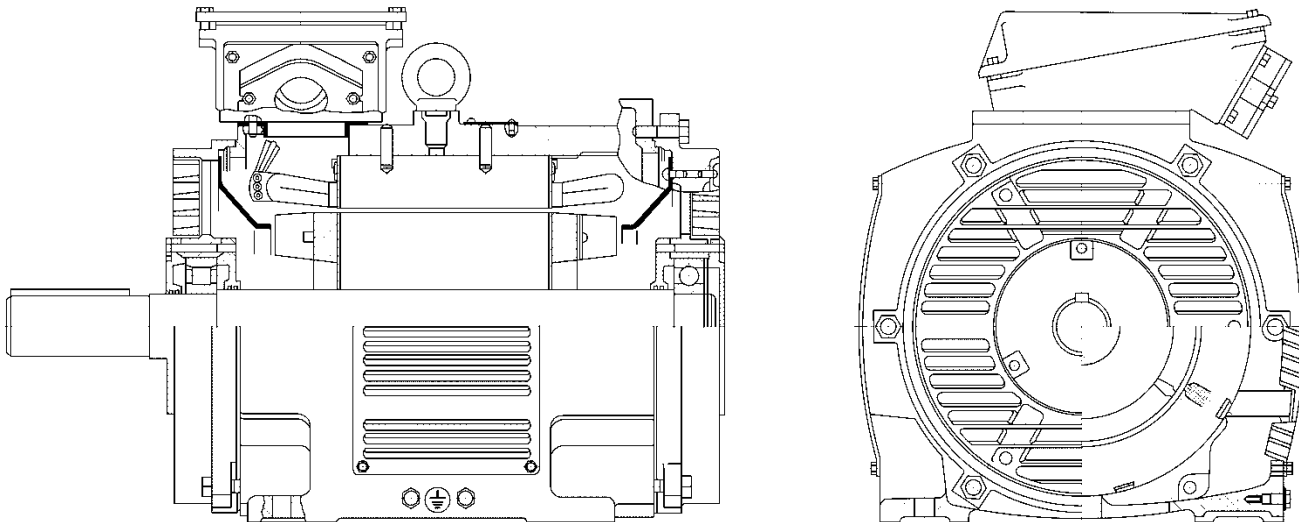


Рис. В.2. Загальний вид асинхронного двигуна серії 4А з висотою осі обертання
 $160 \leq h \leq 250$ мм; ступінь захисту IP23; ротор короткозамкнений

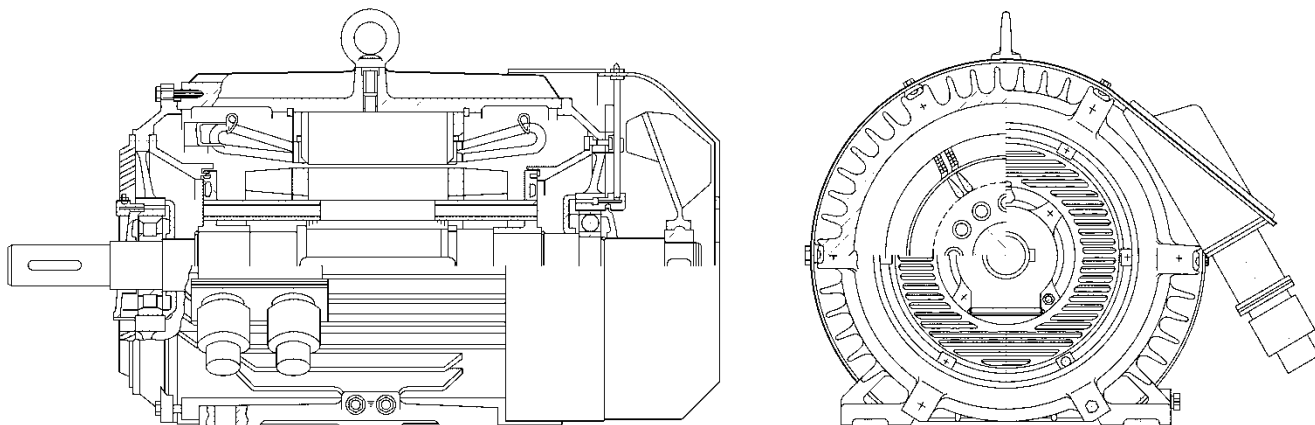
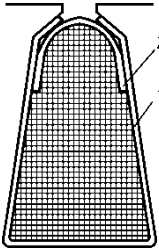
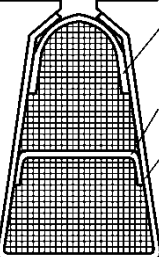


Рис. В.3. Загальний вид асинхронного двигуна серії 4А з висотою осі обертання $280 \leq h \leq 355$ мм; ступінь захисту IP44; ротор короткозамкнений

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1. Ізоляція одношарових обмоток статорів. Напруга до 660 В. Класи ізоляції *B, F, H*

Рисунок	Тип обмотки	Висота осі обертання, мм	Позиція	Матеріал			Товщина, мм	Число шарів	Одностороння товщина, мм
				Найменування, марка					
				Клас <i>B</i>	Клас <i>F</i>	Клас <i>H</i>			
	Одношарова	50-80		Плівкосклопласт					
			1	Ізофлекс	Амідофлекс	0,2	1	0,2	
			2	»	»	0,3	1	0,3	
		90-132		Плівкосклопласт					
			1	Ізофлекс	Амідофлекс	0,25	1	0,25	
			2	»	»	0,35	1	0,35	
		160		Плівкосклопласт					
			1	Ізофлекс	Амідофлекс	0,4	1	0,4	
			2	»	»	0,5	1	0,5	
	Двошарова	180-250		Плівкосклопласт					
			1	Ізофлекс	Амідофлекс	0,4	1	0,4	
			2	»	»	0,4	1	0,4	
			3	»	»	0,5	1	0,5	

Таблиця Г.2. Ізоляція обмоток із круглого проводу статорів асинхронних двигунів з висотою осі обертання $h \geq 280$ мм на напругу до 660 В

Рисунок	Позиція	Матеріал						Число шарів	Одностороння товщина ізоляції, мм		
		Найменування, марка			Товщина, мм				клас <i>B</i>	клас <i>F</i>	клас <i>H</i>
		клас <i>B</i>	клас <i>F</i>	клас <i>H</i>	клас <i>B</i>	клас <i>F</i>	клас <i>H</i>				
		Плівкосинтокартон									
	1*	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
	2**	Електроніт			0,3	0,3	0,28	1	0,3	0,3	0,28
	-	Загальна товщина пазової ізоляції			0,55	0,58	0,56	-	0,55	0,58	0,56
		Лакотканинослюдопласт									
	3	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	0,55	0,55	1	0,55	0,55	0,55
		Плівкосинтокартон									
	4	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
5	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28	

Таблиця Г.3. Гільзова ізоляція (тверда гільза) обмоток статорів машин змінного струму на напругу до 660 В
(Клас нагрівостійкості В нормально і підсилено-вологостійкого виконання)

Частина обмотки	Позиція	Матеріал			Число шарів		Одностороння товщина ізоляції, мм	
		Найменування	Марка	Товщина, мм			по ширині	по висоті
					по ширині	по висоті		
<p>пазова</p> 	1	Виткова ізоляція*					0,2	0,2
	2	Скляна стрічка	ЛЭС	0,1	1 шар у розбіжку		1,4	1,4
	3	Мікафолій	МФГ	0,2	3,5 оберти		1,6	1,6
	4	Двостороння товщина ізоляції пазової частини котушки	—	0,2		3	0,4	0,6
	5	Електроніт	—	0,5	2	1	—	0,5
	6	Електроніт	ГФГС-ЛСБ	0,5	—	1	—	0,5
	7	Лакоскломіканіт	В	—	—	—	—	0,5
		Допуск на укладку		0,5	—	1	0,3	0,5
		Всього на паз (без клина і виткової ізоляції)		—	—	—	2,3	5,8
	8	Мікалента	ЛФЧ-11	0,17	2 шари упівнахлест		1,4	1,4
<p>лобова</p> 	9	Скlostрічка	ЛЭС	0,1	2-й шар упівнахлест		0,4	0,4
	10	Скlostрічка	ЛЭС	0,1	1 шар у розбіжку		0,2	0,2
		Розбухання ізоляції від просочування	—	—	—	—	0,5	0,5
		Двостороння товщина ізоляції лобової частини	—	—	—	—	2,5	2,5

продовження табл. Г.3.

Частина обмотки	Позиція	Матеріал				Число шарів		Одностороння товщина ізоляції, мм		
		Найменування	Марка для класу нагрівостійкості			Товщина, мм	по ширині	по висоті	по ширині	по висоті
			<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>					
<div>пазова</div> 	1	Виткова ізоляція*								
	2	Скляна стрічка	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,2	1 шар у розбіжку		0,2	0,2
	3	Скломікафолій	СМФГ	МФП-Т	СМФК	0,2	3,5 оберти		1,4	1,4
		Двостороння товщина ізоляції пазової частини котушки	—	—	—	—		—	1,6	1,6
	4	Склоакотканина	ЛСБ	ЛСБ	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Склотекстоліт	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5	—	1	—	0,5
	6	Лакоскломіканіт	ГФГС-ЛСБ	ГФПС-ЛСП	ГФКС-ЛСК	0,5	—	1	—	0,5
	7	Склотекстоліт	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5	—	1	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—	—	—	—	—	0,3	0,5
		Всього на паз (без клина і виткової ізоляції)	—	—	—	—	—	—	2,2	5,7
	8	Скломікалента	С2ЛФГ	С2ЛФГ	ЛС2ФК	0,17	2 шари упівнахлест		1,4	1,4
	9	Скlostрічка	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	1 шар упівнахлест		0,4	0,4
	10	Скlostрічка	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,1	1 шар у розбіжку		0,2	0,2
<div>лобова</div> 		Розбухання ізоляції від просочування	—	—	—	—	—	0,5	0,5	
		Двостороння товщина ізоляції лобової частини котушки	—	—	—	—	—	—	2,5	2,5

Таблиця Г.4. Безперервна термореактивна ізоляція класів нагрівостійкості *B* та *F* обмоток статорів машин змінного струму на напругу до 660 В

Частина обмотки	Позиція	Матеріал			
		Призначення ізоляції	Назва	Марка	Товщина, мм
<p>пазова</p> 	1	Виткова ізоляція	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933) Розбухання ізоляції від промазування лаком	ЛЭС	0,1
	2	Корпусна	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
	3	Покривна	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
			Всього ізоляції у котушці		
	4	Прокладка	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
	5	Прокладка	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
	6	Прокладка	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
			Допуск на укладку		
			Всього ізоляції у пазу		
<p>лобова</p> 	1	Виткова ізоляція	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933) Розбухання ізоляції	ЛЭС	0,1
	7	Корпусна	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
	8	Покривна	Скляна стрічка (просочена у лаку ПЭ-933)	ЛЭС	0,2
			Всього ізоляції у лобових частинах	—	

продовження табл. Г4

Позиція	Матеріал							
	Число шарів	Двостороння товщина, мм, при числі провідників						
		по ширині		по висоті				
		1	2	2	3	4	5	6
1	1 шар упівнахлест	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
		0,05	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
2	4 шари впівнахлест	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
3	1 шар упівнахлест	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
		3,03	3,08	3,53	4,03	4,53	5,03	5,53
4	1	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	1	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6	1	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		0,2	0,2	-	-	-	-	-
		3,23	3,28	9,06	10,06	11,06	12,06	13,06
1	1 шар у півнахлест	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
		0,05	0,1	0,1	0,15	0,2	0,15	0,3
7	3 шари впівнахлест	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
8	2 шари впритик	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		2,96	3,01	3,46	3,96	4,46	4,96	5,46

Примітка до табл. Г.3. У якості виткової ізоляції у обмотках з ізоляцією класу нагрівостійкості *B* застосовують прокладки із гнучкого міканіту ФГФЧО, у обмотках з ізоляцією класу нагрівостійкості *F* – із гнучкого скломіканіта Г₂ФЄ1, у обмотках з ізоляцією класу нагрівостійкості *H* – із гнучкого скло міканіту Г2ФК-11. Товщина прокладок 0,2-0,25 мм.

ДОДАТОК Д

Таблиця Д1. Діаметр та площа поперечного перерізу круглих мідних емальованих проводів марок ПЕТВ та ПЕТ-155

№ п/п	Номинальний діаметр неізолюваного провідника $d_{ел}$, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного провідника $d_{із}$, мм	Площа поперечного перерізу неізолюваного провідника $q_{ел}$, мм ²
1	0,28	0,315	0,0616
2	0,30	0,335	0,0707
3	0,315	0,350	0,0779
4	0,335	0,370	0,0881
5	0,355	0,395	0,099
6	0,375	0,415	0,1104
7	0,40	0,44	0,1257
8	0,425	0,465	0,1419
9	0,45	0,49	0,1590
10	0,475	0,515	0,1772
11	0,50	0,545	0,1963
12	0,53	0,585	0,221
13	0,56	0,615	0,246
14	0,60	0,655	0,283
15	0,63	0,69	0,312
16	0,67	0,73	0,353
17	0,71	0,77	0,396
18	0,75	0,815	0,442
19	0,80	0,865	0,503
20	0,85	0,915	0,567
21	0,90	0,965	0,636
22	0,95	1,015	0,709
23	1,00	1,08	0,785
24	1,06	1,14	0,883
25	1,12	1,20	0,985
26	1,18	1,26	1,094
27	1,25	1,33	1,227
28	1,32	1,405	1,368
29	1,40	1,485	1,539
30	1,50	1,585	1,767
31	1,60	1,685	2,011

Таблиця Д2. Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної проволочки

b , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні a , мм								
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25
	Розрахунковий переріз проволочки $q_{ель}$, мм ²								
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285
2,12	1,559	-	1,734	-	1,905	-	2,160	-	2,435
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585
2,36	1,751	-	1,950	-	2,145	-	2,429	-	2,735
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910
2,65	1,983	-	2,211	-	2,435	-	2,753	-	3,098
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285
3,00	2,263	-	2,526	-	2,785	-	3,145	-	3,535
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723
3,35	2,543	-	2,841	-	3,135	-	3,537	-	3,973
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223
3,75	2,863	-	3,201	-	3,535	-	3,985	-	4,473
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785
4,25	3,263	-	3,651	-	4,035	-	4,545	-	5,098
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410
4,75	3,663	-	4,101	-	4,535	-	5,105	-	5,723
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035
5,30	4,103	-	4,596	-	5,085	-	5,721	-	6,410
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785
6,00	4,663	-	5,226	-	5,785	-	6,505	-	7,285
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660
6,70	-	-	5,856	-	6,485	-	7,289	-	8,160
7,10	-	-	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660
7,50	-	-	-	-	7,285	-	8,185	-	9,160
8,00	-	-	-	-	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785
8,50	-	-	-	-	-	-	9,305	-	10,41

Таблиця Д3. Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної проволоки

b, мм	Номинальний розмір проволоки по меншій стороні a, мм								
	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Розрахунковий переріз проволоки q_{el} , мм ²								
2,00	2,425	2,585	-	-	-	-	-	-	-
2,12	-	2,753	-	-	-	-	-	-	-
2,24	2,742	2,921	3,145	3,369	-	-	-	-	-
2,36	-	3,089	-	3,561	-	-	-	-	-
2,50	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	-	-	-
2,65	-	3,495	-	4,025	-	4,407	-	-	-
2,80	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	-
3,00	-	3,985	-	4,585	-	5,038	-	5,638	-
3,15	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	-	4,475	-	5,145	-	5,667	-	6,337	-
3,55	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	-	5,035	-	5,785	-	6,387	-	7,137	-
4,00	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	-	5,735	-	6,585	-	7,287	-	8,137	-
4,50	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	-	6,435	-	7,385	-	8,188	-	9,137	-
5,00	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	-	7,205	-	8,265	-	9,177	-	10,24	-
5,60	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,00	-	8,185	-	9,385	-	10,44	-	11,64	-
6,30	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,70	-	9,165	-	10,51	-	11,70	-	13,04	-
7,10	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,50	-	10,29	-	11,79	-	13,14	-	14,64	-
8,00	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,50	-	11,69	-	13,39	-	14,94	-	16,64	-
9,00	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,50	-	13,09	-	14,99	-	16,74	-	18,64	-
10,0	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	-	14,63	-	16,75	-	18,72	-	20,84	-

Таблиця Д4. Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної проволочки

b , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні a , мм								
	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55
	Розрахунковий переріз проволочки $q_{\text{ст}}$, мм ²								
3,15	6,693	-	-	-	-	-	-	-	-
3,35	7,141	-	-	-	-	-	-	-	-
3,55	7,589	7,829	8,326	-	-	-	-	-	-
3,75	8,037	-	8,826	-	-	-	-	-	-
4,00	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	-	-	-	-
4,25	9,157	-	10,08	-	11,35	-	-	-	-
4,50	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	-	-
4,75	10,28	-	11,33	-	12,75	-	14,41	-	-
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20
5,30	11,51	-	12,70	-	14,29	-	16,15	-	18,27
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33
6,00	13,08	-	14,45	-	16,25	-	18,35	-	20,75
6,30	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82
6,70	14,65	-	16,20	-	18,21	-	20,56	-	23,24
7,10	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66
7,50	16,44	-	18,20	-	20,45	-	23,08	-	26,08
8,00	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85
8,50	18,68	-	20,70	-	23,25	-	26,23	-	29,63
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40
9,50	20,92	-	23,20	-	26,05	-	29,38	-	33,18
10,0	22,04	23,05	28,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95
10,8	23,38	-	25,95	-	29,13	-	32,84	-	37,08
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21
11,8	26,07	-	28,95	-	32,49	-	36,62	-	41,34
12,5	27,64	24,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83

Таблиця Д5. Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної проволочки

b , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні a , мм							
	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Розрахунковий переріз проволочки $q_{\text{ев}}$, мм ²							
5,60	20,14	21,54	-	-	-	-	-	-
6,00	-	23,14	-	-	-	-	-	-
6,30	22,77	24,34	25,92	27,49	-	-	-	-
6,70	-	25,94	-	29,29	-	-	-	-
7,10	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	-	-
7,50	-	29,14	-	32,89	-	36,64	-	-
8,00	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	-	33,14	-	37,39	-	41,64	-	46,74
9,00	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	-	37,14	-	41,89	-	46,64	-	52,34
10,0	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,8	-	41,54	-	46,84	-	52,14	-	58,50
11,2	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	-	46,34	-	52,24	-	52,14	-	65,22
12,5	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Таблиця Д6. Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної проволоки

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

Таблиця Д7. Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної проволочки

b , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні a , мм												
	5,00	5,10	5,30	5,50	5,60	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,5
	Розрахунковий переріз проволочки q_{en} , мм ²												
10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96,34	-	-	-
11,2	55,14	-	58,50	-	61,86	-	-	-	-	-	-	-	-
11,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103,54	-	-	-
11,8	58,14	-	-	-	65,22	-	-	-	-	-	-	-	-
12,5	61,64	-	65,39	-	69,14	-	-	-	99,14	111,64	124,14	136,66	155,4
13,2	65,14	-	-	-	73,06	-	-	-	-	-	-	-	-
13,5	-	-	-	-	-	-	-	93,64	107,14	120,64	-	-	-
14,0	69,14	-	73,34	-	77,54	-	-	-	-	-	-	-	-
14,5	-	-	-	-	-	-	93,39	100,64	115,14	129,64	-	-	-
15,0	74,14	-	-	-	83,14	-	-	-	-	-	-	-	-
15,6	-	-	-	-	-	-	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	-	-
16,0	79,14	-	83,94	-	88,74	95,14	-	-	127,14	-	-	-	-
16,8	-	84,82	-	91,54	-	99,94	108,34	116,74	133,54	-	-	-	-
18,0	-	90,94	-	98,14	-	107,14	116,14	125,14	143,14	-	-	-	-
19,5	-	98,59	-	106,39	-	116,14	125,89	135,64	155,14	-	-	-	-
20,0	99,14	-	-	-	-	119,14	-	-	159,14	-	-	-	-
22,0	-	111,34	-	120,14	-	131,14	142,14	153,14	-	-	-	-	-
25,0	124,14	126,64	-	136,64	-	149,14	161,64	174,14	-	-	-	-	-
26,3	-	133,27	-	143,79	-	158,94	170,09	183,24	-	-	-	-	-
28,0	-	141,94	-	153,14	-	167,14	181,14	195,14	-	-	-	-	-
30,0	149,14	152,14	-	164,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32,0	-	162,34	-	175,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ДОДАТОК Е

Таблиця Е1. Допустимі значення індукції на різних ділянках магнітного ланцюга, Тл

Ділянки магнітного ланцюга	Позначення	ІР44				
	2р	2	4	6	8	10, 12
1. Ярмо статора	B_a	1,4 - 1,6	1,4-1,6	1,4-1,6	1,15-1,35	1,1-1,2
2. Зубці статора при постійному перерізі (всипна обмотка)	B_{z1}	1,6 - 1,9	1,6 - 1,9	1,6-1,9	1,6-1,9	1,6-1,8
3. Зубці статора в найбільш вузькому перерізі:						
- при напіввідкритих пазах;	$B_{z1\max}$	1,75 - 1,95	1,75 - 1,95	1,75-1,95	1,75-1,95	1,75-1,95
- при відкритих пазах.	$B_{z1\max}$	1,6 - 1,9	1,6 - 1,9	1,6-1,9	1,6-1,9	1,6-1,9
4. Ярмо ротора:						
- короткозамкненого;	B_j	≤1,45	≤1,4	≤1,2	≤1	≤1
- фазного.	B_j	-	≤1,3	≤1,15	≤0,9	≤0,9
5. Зубці ротора при постійному перерізі (грушовидні пази)	B_{z2}	1,7 - 1,95	1,7 - 1,95	1,7-1,95	1,7-1,95	1,7-1,95
6. Зубці ротора в найбільш вузькому перерізі:	$B_{z2\max}$	1,5 - 1,7	1,5 - 1,7	1,6-1,9	1,6-1,9	1,6-1,9
- короткозамкненого;						
- фазного.	$B_{z2\max}$	1,75 - 2,15	1,75 - 2,15	1,7-1,95	1,7-1,95	1,7-1,95

Додаток Е2. Допустимі значення індукції на різних ділянках магнітного ланцюга, Тл

Ділянки магнітного ланцюга	Позначення	ІР23					
	$2p$	2	4	6	8	10	12
1. Ярмо статора	B_a	1,45-1,6	1,45- 1,6	1,45-1,6	1,2-1,4	1,2-1,4	1,1-1,3
2. Зубці статора при постійному перерізі (всипна обмотка)	B_{z1}	1,8-2,05	1,7-1,95	1,7-1,95	1,7-1,95	1,6-1,9	1,6-1,9
3. Зубці статора в найбільш вузькому перерізі:							
- при напіввідкритих пазах;	$B_{z1\max}$	1,9-2,1	1,8-2,0	1,8-2,0	1,8-2,0	1,8-2,0	1,8-2,0
- при відкритих пазах	$B_{z1\max}$	1,7-2	1,7-2	1,7-2	1,7-2	1,7-2	1,7-2
4. Ярмо ротора:							
- короткозамкненого;	B_j	$\leq 1,55$	$\leq 1,5$	$\leq 1,3$	$\leq 1,1$	$\leq 1,1$	$\leq 1,1$
- фазного.	B_j	-	$\leq 1,4$	$\leq 1,2$	≤ 1	≤ 1	≤ 1
5. Зубці ротора при постійному перерізі (грушовидні пази)	B_{z2}	1,75-2	1,75-2	1,75-2	1,75-2	1,75-2	1,75-2
6. Зубці ротора в найбільш вузькому перерізі:							
Короткозамкненого;	$B_{z2\max}$	1,75-2	1,75-2	1,7-1,95	1,7-1,95	1,7-1,95	1,7-1,95
- фазного.	$B_{z2\max}$	1,9-2,2	1,9-2,2	1,85-2,1	1,85-2,1	1,85-2,1	1,85-2,1

ДОДАТОК Ж

Таблиця Ж1. Крива намагнічування для ярма АД. Сталь 2013.

B , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H , А/м										
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблиця Ж2. Крива намагнічування для ярма АД. Сталь 2211, 2312.

B , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H , А/м										
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Таблиця Ж3. Крива намагнічування для зубців АД. Сталь 2013.

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920

Таблиця Ж4. Крива намагнічування для зубців АД. Сталь 2211 і 2312.

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
									$H, A/M$	
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	284	290	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200

ДОДАТОК 3

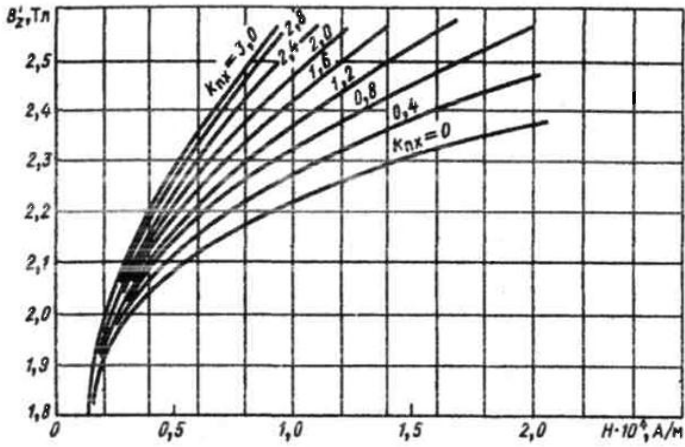


Рис. 3.1. Криві намагнічування сталі марки 2013.

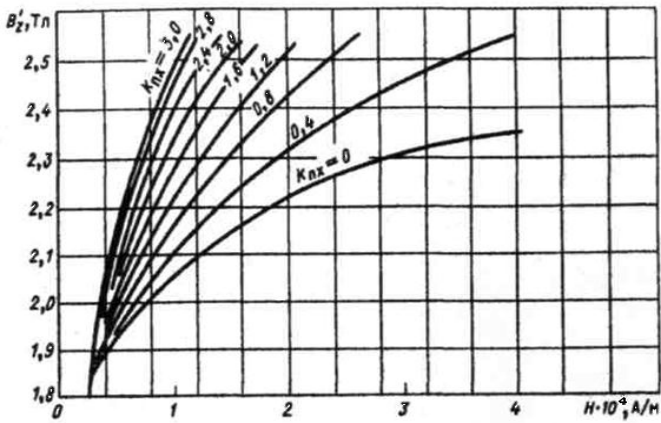


Рис. 3.2. Криві намагнічування сталей марок 2211, 2312, 2411.

Література

1. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов/ И.П.Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К.Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с., ил.
2. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 3 изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
3. Яцун М.А. Електричні машини: Навч. посібник. – 2-ге вид., стереот. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 440 с.
4. О.Д. Гольдберг, Я.С.Гурин, И.С.Свириденко Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов/ Под ред. О.Д. Гольдберга. 2-е изд., перераб. и доп.- М.: «Высшая школа», 2001. – 430 с., ил.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э.Кравчик, М.М.Шлаф, В.И.Афонин, Е.А. Соболенская. - М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.
6. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М.М.Кацман.- М.: Издательский центр «Академия», 2005.-480 с.