

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до практичних занять та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН»**

*(для студентів 5 курсу денної та 5–6 курсу заочної форм  
навчання спеціальності*

*141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів)*

**Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2018**

Методичні рекомендації до практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Комп'ютерне проектування електричних машин» (для студентів 5 курсу денної та 5-6 курсу заочної форм навчання спеціальності 141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : О. М. Петренко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 53 с.

Укладач О. М. Петренко

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. Є. Плюгін

Рекомендовано кафедрою «Електричний транспорт», протокол № 3 від 18.10.2016.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Практичне заняття № 1 «Визначення головних розмірів двигуна».....	5
Питання для самостійної роботи.....	8
Практичне заняття № 2 «Проектування статора».....	8
Питання для самостійної роботи.....	16
Практичне заняття № 3 «Проектування ротора».....	16
Питання для самостійної роботи.....	23
Практичне заняття № 4 «Перевірний розрахунок».....	24
Питання для самостійної роботи.....	52
Список використаних джерел.....	53

## **ВСТУП**

Курс практичних занять з дисципліни «Комп'ютерне проектування електричних машин» є невід'ємною важливою частиною аудиторного комплексу занять спрямованих на формування у студентів системи знань, умінь і навичок з комп'ютерного проектування конкретних типів електричних машин і набуття навичок володіння системами автоматизованого проектування машин.

Комп'ютерне проектування розширює, систематизує і поглиблює знання, дозволяє набути досвід самостійного проектування електричних машин і апаратів з використанням сучасних засобів автоматизації. Рівень засвоєння дисципліни повинен дозволяти магістрам з використанням технічної літератури вирішувати задачі проектування електричних машин і апаратів на базі професійних програмних продуктів.

Ці вказівки розроблені відповідно до програми дисципліни «Комп'ютерне проектування електричних машин» і призначені для студентів спеціальності 141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів при виконання розділів курсових і дипломних проектів, пов'язаних з проектування електричних машин.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

### «Визначення головних розмірів двигуна»

**Ціль заняття.** Одержання практичних навичок визначення головних розмірів двигуна.

Головними розмірами асинхронного двигуна є зовнішній  $d_{se}$  і внутрішній  $d_s$  діаметри статора, а також активна довжина його осердя  $l_s$ . Ці розміри жорстко пов'язані з висотою осі обертання вала  $h$ .

#### ***Висота осі обертання***

Висота осі обертання  $h$ , пов'язана з номінальною потужністю  $P_N$  і синхронною частотою обертання  $n_s$  двигуна. Її попереднє значення вибирається за таблицею 1.1.

Таблиця 1.1 – Вибір осі обертання вала двигуна

$h$ , мм	$n_s$ , об/хв.			
	3000	1500	1000	750
	$P_N$ , кВт			
56	0,18; 0,25	0,12; 0,18	-	-
63	0,37; 0,55	0,25; 0,37	0,18; 0,25	-
71	0,75; 1,1	0,55; 0,75	0,37; 0,55	0,25
80	1,5; 2,2	1,1; 1,5	0,75; 1,1	0,37; 0,55
90	3	2,2	1,5	0,75
100	4; 5,5	3; 4	2,2	1,5
112	7,5	5,5	3; 4	2,2; 3
132	11	7,5; 11	5,5; 7,5	4; 5,5
160	15; 18,5	15; 18,5	11; 15	7,5; 11

#### ***Зовнішній діаметр статора***

Зовнішній діаметр статора  $d_{se}$ , визначається за допомогою таблиці 1.2 за вибраною величиною  $h$ . Значення  $d_{se}$  нормалізовані з урахуванням стандартних розмірів рулонної сталі, з якої штамнуються листи статора.

Таблиця 1.2 – Вибір зовнішнього діаметра статора

$h$ , мм	56	63	71	80	90	100	112	132	160
$d_{se}$ , мм	89	100	116	131	149	168	191	225	272

### Внутрішній діаметр статора

Попереднє значення внутрішнього діаметра осердя статора  $d_s$ , мм, визначається за співвідношенням  $d_s = k_{ds} \cdot d_{se}$ . Значення коефіцієнта  $k_{ds}$  вибирається з таблиці 1.3 залежно від кількості полюсів.

Таблиця 1.3 – Коефіцієнт для визначення внутрішнього діаметра статора

$2p$	2	4	6	8-12
$k_{ds}$	0,52-0,57	0,64-0,68	0,7-0,72	0,74-0,77

Попереднє значення довжини осердя статора

$$l'_s = \frac{8,62 \cdot 10^{10} \cdot P_{calc}}{d_s^2 \cdot A_s \cdot B_\delta \cdot K_{ws} \cdot n_s},$$

де  $P_{calc}$  – розрахункова потужність двигуна, кВт·А

$$P_{calc} = \frac{P_N \cdot K_E}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N}$$

де  $K_E$  – коефіцієнт відношення ЕРС в фазі обмотки статора  $E_s$ , до номінальної фазної напруги  $U_{sN}$ , визначається за рисунком 1.1.

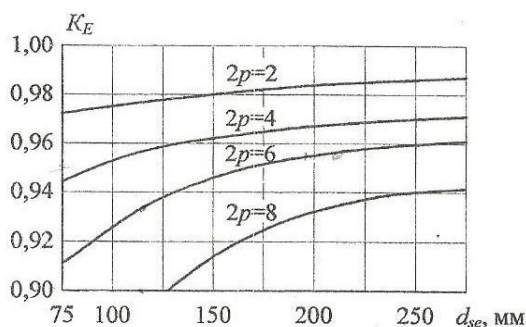


Рисунок 1.1 – Вибір коефіцієнта відношення ЕРС до номінальної напруги

$\eta_N$  – номінальний коефіцієнт корисної дії, визначається за рисунком 1.2;

$\cos \varphi_N$  – номінальний коефіцієнт потужності, визначається за рисунком 1.3;

$A_s$  – лінійне навантаження, А/см, визначається за рисунком 1.4;

$B_\delta$  – магнітна індукція в повітряному проміжку, Тл, визначається за рисунком 1.5;

$K_{ws}$  – обмотковий коефіцієнт, який для одношарових обмоток статора (саме таку й планується застосовувати) приймається рівним 0,95...0,96.

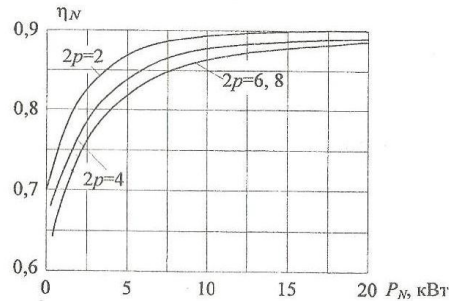


Рисунок 1.2 – Вибір ККД

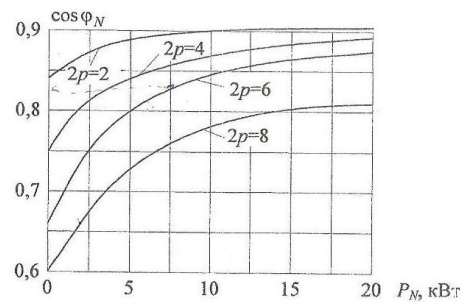


Рисунок 1.3 – Вибір коефіцієнта потужності

Отримане в результаті розрахунку значення  $l'_s$  округляємо до цілого числа з точністю до 1 мм при  $l'_s < 100$  мм і з точністю до 5 мм при  $l'_s > 100$  мм.

Дане округлене значення розрахункової довжини осердя статора є і конструктивною довжиною осердя  $l_s$ .

Оцінка правильності вибору головних розмірів проводиться за відношенням  $\lambda_s = l_s / d_s$ . При правильному виборі головних розмірів  $\lambda_s = 1,3 - 1,4$ .

Якщо  $\lambda_s$  перевищує вказані межі, необхідно задатися більшим стандартним значенням висоти осі обертання  $h$  і повторити розрахунок головних розмірів, якщо  $\lambda_s$ , менше вказаних значень, розрахунок повторюється при меншому стандартному значенні  $h$ .

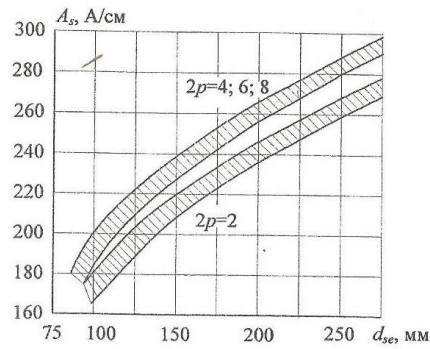


Рисунок 1.4 – Вибір лінійного навантаження

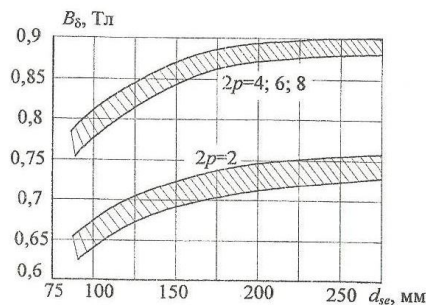


Рисунок 1.5 – Вибір магнітної індукції в повітряному проміжку

### Питання для самостійного вивчення

1. За рахунок якого відношення проводиться оцінка правильності вибору головних розмірів?
2. Чим користуються при виборі магнітної індукції в повітряному проміжку?

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

### «Проектування статора»

**Ціль заняття.** Одержання практичних навичок виконання розрахунків обмотки статора, визначення кількості пазів осердя статора, їх конфігурації та розмірів.

Осердя статора асинхронних двигунів з висотою осі обертання  $h \leq 250$  мм збирають з листів завтовшки 0,5 мм, відштампованих з холоднокатаної ізотропної електротехнічної сталі однієї з марок 2013, 2312, 2411.



Ізолювання листів сталі проводиться шляхом оксидування: у цьому разі коефіцієнт заповнення осердя сталлю  $K_{Fe} = 0,97$ .

#### *Кількість пазів статора*

$$Q_s = 2 \cdot p \cdot m_s \cdot q_s,$$

де  $q_s$  – кількість пазів статора на полюс і фазу.

Рекомендовані значення  $q_s$  подані в таблиці 2.1. Звичайно вибирається ціле число  $q_s$ , і тільки для уніфікації листів статора двигунів з різною кількістю полюсів, а також для тихохідних двигунів приймають дробові значення  $q_s$ .

Таблиця 2.1 – Вибір кількості пазів статора на полюс і фазу

$h$ , мм	50-132				160			
$2p$	2	4	6	8	2	4	6	8
$q_s$	3; 4	2; 3	2; 3	1,5; 2	5	3	3	2

#### *Тип обмотки статора*

У асинхронних двигунах з висотою осі  $h \leq 160$  мм застосовують одношарові концентричні всипні обмотки статора, призначені для механізованого укладання в напівзакриті пази трапецеїдальної форми.

Одношарова концентрична обмотка виконується з кроком по пазах, еквівалентним діаметральному,

$$y_{Q_s} = \frac{Q_s}{2p}.$$

Тоді коефіцієнт скорочення обмотки  $K_{ps} = 1$  і обмотувальний коефіцієнт  $K_{ws} = K_{ds} \cdot K_{ps}$  визначається тільки коефіцієнтом розподілу обмотки  $K_{ds}$

$$K_{ws} = K_{ds} = \frac{0,5}{q_s \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{q_s}\right)}.$$

#### *Кількість витків у фазі обмотки статора*

Спочатку визначається попередня кількість витків

$$N'_s = \frac{K_E \cdot U_{sN}}{4,44 \cdot f_s \cdot K_{ws} \cdot \Phi'}$$

де  $\Phi'$  – попереднє значення магнітного потоку, Вб,

$$\Phi' = \frac{B_{\delta} \cdot d_s \cdot l_s \cdot 10^{-6}}{p}$$

Для уточнення кількості витків необхідно визначити кількість ефективних провідників в пазу

$$z'_{Qs} = \frac{N'_s \cdot a_s}{p \cdot q_s},$$

де  $a_s$  – кількість паралельних віток обмотки статора, яку приймаємо рівною одиниці (при необхідності  $a_s$  може бути збільшені, але обов'язково повинна бути одним з дільників кількості пар полюсів  $p$ ).

Оскільки кількість ефективних провідників в пазу повинна бути цілим числом, то виконується округлення  $z'_{Qs}$  до найближчого цілого числа, і після визначення  $z'_{Qs}$  уточнюються:

- кількість витків у фазі обмотки статора

$$N_s = \frac{z_{Qs} \cdot p \cdot q_s}{a_s},$$

- магнітний потік, Вб

$$\Phi = \frac{\Phi' \cdot N'_s}{N_s},$$

- магнітна індукція у повітряному проміжку, Тл,

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot p \cdot 10^6}{d_s \cdot l_s}.$$

Для оцінки правильності визначення кількості витків уточнюється лінійне навантаження  $A_s$ , А/см,

$$A_s = \frac{10 \cdot z_{Qs} \cdot Q_s \cdot I_{sN}}{\pi \cdot d_s \cdot a_s},$$

де  $I_{sN}$  – номінальний фазний струм обмотки статора, А, (при  $P_N$  в кВт)

$$I_{sN} = \frac{P_N \cdot 10^3}{3 \cdot U_{sN} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}.$$

Уточнення значення  $A_s$ , не повинне відрізнятися від заздалегідь прийнятого більш ніж на 10%. Інакше слід змінити кількість витків  $N_s$  у фазній обмотці і знов перерахувати пов'язані з цим попередньо визначені параметри.

### *Розміри трапецеїдальних пазів статора*

Для вибору параметрів дроту обмотки статора необхідно визначити розміри трапецеїдальних пазів статора (рис. 2.1), а саме: висоту паза статора  $h_s$ , велику і меншу ширину паза ( $b_{s3}$  і  $b_{s2}$ ), висоту і ширину шліца ( $h_{s1}$  і  $b_{s1}$ ).

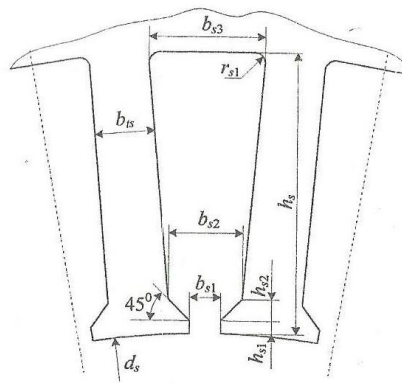


Рисунок 2.1 – Зубцево-пазова структура осердя статора

Зубцевий крок статора на розточці його осердя, мм

$$\tau_s = \frac{\pi \cdot d_s}{Q_s}.$$

Висота паза статора  $h_s$ , мм,

$$h_s = \frac{d_{se} - d_s}{2} - h_{ys},$$

де  $h_{ys}$  – висота спинки статора, мм,

$$h_{ys} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot K_{Fe} \cdot l_s \cdot B_{ys}}.$$

Середнє значення магнітної індукції в спинці статора  $B_{ys}$ , Тл, вибирається за таблицею 2.2 залежно від кількості полюсів.

Таблиця 2.2 – Рекомендоване значення магнітної індукції в спинці статора

$2p$	2	4	6	8
$B_{ys}$	1,55-1,75	1,55-1,75	1,4-1,6	1,1-1,3

Ширина зубця статора  $b_{ts}$ , мм, по всій висоті його основної частини приймається однаковою (рис. 2.2).

$$b_{ts} = \frac{\tau_s \cdot B_\delta}{K_{Fe} \cdot B_{ts}},$$

де  $B_{ts}$  – середнє значення магнітної індукції в зубцях статора, приймається у межах (1,75–1,95) Тл, але при  $h \geq 160$  мм і  $2p \geq 4$  на рівні (1,6-1,8) Тл.

Висота шліца  $h_{s1}$  приймається рівною 0,5 мм, ширина  $b_{s1}$ , мм,

$$b_{s1} \approx 0,3 \cdot \sqrt{h}.$$

Тоді становляться визначеними для паза його менша ширина  $s$ , мм,

$$b_{s2} = \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot h_{s1} - b_{s1}) - Q_s \cdot b_{ts}}{Q_s - \pi}$$

і більша ширина  $b_{s3}$ , мм,

$$b_{s3} = \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot h_s)}{Q_s} - b_{ts}.$$

Після вибору діаметра ізолюваного дроту значенні  $b_{s1}$  уточнюється і, при необхідності, корегується і величина  $b_{s2}$ , яка, в принципі, визначена приблизно через неврахування висоти коронки зубця  $h_{s2}$ .

#### *Діаметр елементарного ізолюваного дроту*

Для обмотки статора застосовуємо дріт ПЕТ-155 (клас нагрівостійкості F). При механізації обмотувальних робіт застосовують дріт з механічно міцнішою ізоляцією марки ПЕТМ-155.

Попереднє діаметр елементарного ізолюваного дроту  $d'_{scis}$ , мм,

$$d'_{scis} = \sqrt{\frac{K_{Qs} \cdot S_{sn}}{z_{Qs} \cdot N_c}},$$

де  $K_{Qs}$  – коефіцієнт заповнення паза, який при механізованому укладанні обмотки не повинен перевищувати 0,72 і для розрахунку  $d'_{scis}$ , приймається близьким до максимального;

$S_{sn}$  – площа поперечного перерізу паза, зайнята обмоткою,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{sn} = S'_{sn} - S_{isfr} - S_{isp},$$

$S'_{sn}$  – площа поперечного перерізу паза на просвіт,  $\text{мм}^2$ ,

$$S'_{sn} = \left( \frac{b_{s2} + b_{s3}}{2} - 0,1 \right) \cdot \left( h_s - h_{s1} - \frac{b_{s2} - b_{s1}}{2} - 0,1 \right);$$

$S_{isfr}$  – площа поперечного перерізу корпусної ізоляції,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{isfr} = b_{isfr} (2 \cdot h_s + b_{s3} + b_{s2}),$$

$b_{isfr}$  – середнє значення односторонньої товщини корпусної ізоляції, мм,

визначається за таблицею 2.3.

$S_{isp}$  – площа поперечного перерізу прокладок на дні паза і під клином,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{isp} = 0,5 \cdot b_{s3} + 0,75 \cdot b_{s2},$$

$N_c$  – кількість елементарних провідників в одному ефективному, яку вибирають виходячи з того, щоб діаметр ізольованого дроту при машинному укладанні не перевищував 1,33 мм.

При розрахунку  $S'_{sn}$  враховані припуски на складання статора, які дорівнюють 0,1 мм, але при  $h \geq 160$  мм це слід замінити на 0,2 мм.

Таблиця 2.3 – Середня одностороння товщина корпусної ізоляції

$h$ , мм	50-80	90-132	160-180
$b_{isfr}$ , мм	0,2	0,25	0,4

Після визначення попереднього значення діаметра ізольованого дроту за таблицею 2.4 знаходять найближчий стандартизований діаметр  $d_{scis}$ , відповідний йому діаметр неізольованого дроту  $d_{sc}$  і площу поперечного перерізу  $S_{sc}$ .

Оскільки попереднє  $d'_{scis}$  і остаточне  $d_{scis}$  можуть не співпадати, тоді уточнюють коефіцієнт заповнення паза  $K_Q$  і ширину шліца  $b_{s1}$ , мм.

$$K_Q = \frac{z_{Qs} \cdot N_C \cdot d_{scis}^2}{S_{sn}};$$

$$b_{s1} = d_{scis} + 2 \cdot b_{isfr} + 0,4.$$

Таблиця 2.4 – Діаметри і площі поперечного перерізу мідних проводів марки ПЕТ-155 (ГОСТ21428)

Діаметр ізолюваного дроту, мм	Діаметр неізолюваного дроту, мм	Площа поперечного перерізу неізолюваного дроту, мм <sup>2</sup>	Діаметр ізолюваного дроту, мм	Діаметр неізолюваного дроту, мм	Площа поперечного перерізу неізолюваного дроту, мм <sup>2</sup>
0,080	0,06	0,00283	0,530	0,49	0,1886
0,090	0,07	0,00385	0,565	0,51	0,2040
0,100	0,08	0,00503	0,585	0,53	0,2210
0,110	0,09	0,00686	0,605	0,55	0,2380
0,122	0,10	0,00785	0,625	0,57	0,2550
0,132	0,11	0,00950	0,645	0,59	0,2730
0,142	0,12	0,01131	0,675	0,62	0,3020
0,152	0,13	0,01327	0,700	0,64	0,3220
0,162	0,14	0,01539	0,730	0,67	0,3530
0,180	0,15	0,01767	0,750	0,69	0,3740
0,190	0,16	0,0201	0,780	0,72	0,4070
0,200	0,17	0,0227	0,805	0,74	0,4300
0,210	0,18	0,0225	0,835	0,77	0,4660
0,220	0,19	0,0284	0,865	0,80	0,5030
0,230	0,20	0,0314	0,895	0,83	0,5410
0,240	0,21	0,0346	0,925	0,86	0,5810
0,265	0,23	0,0415	0,965	0,90	0,6360
0,285	0,25	0,0491	0,995	0,93	0,6790
0,305	0,27	0,0573	1,025	0,96	0,7240
0,325	0,29	0,0661	1,080	1,00	0,785
0,345	0,31	0,0755	1,120	1,04	0,849
0,365	0,33	0,0855	1,160	1,08	0,916
0,390	0,35	0,0962	1,200	1,12	0,985
0,420	0,38	0,1134	1,240	1,16	1,057
0,450	0,41	0,1320	1,280	1,2	1,131
0,480	0,44	0,1521	1,330	1,25	1,227
0,510	0,47	0,1735	1,385	1,3	1,327

Після порівняння уточненого і заздалегідь прийнятого значень  $b_{s1}$  остаточно приймається більше з них.

Визначається густина струму в провіднику обмотки статора  $J_{sc}$ , А/мм<sup>2</sup>,

$$J_{cs} = \frac{I_{sN}}{N_c \cdot S_{cs} \cdot a_s}$$

і проводиться оцінка правильності вибору  $d_{scis}$  за добутком лінійного навантаження  $A_s$ , на цю густину струму  $J_{sc}$ , а саме, за  $A_s \cdot J_{sc}$ ,  $A^2/(\text{см}/\text{мм}^2)$ .

Добуток  $A_s \cdot J_{sc}$  необхідно порівняти з середнім допустимим значенням, яке визначається за рисунком 2.2 залежно від зовнішнього діаметра статора  $d_{se}$  (для  $2p=2$  середнє допустиме значення в 0,78разу менше визначеного за рис. 2.2).

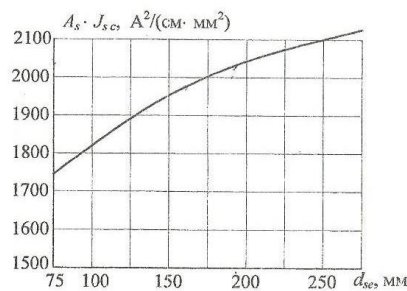


Рисунок 2.2 – Допустиме співвідношення струмових навантажень

Якщо отриманий при розрахунку показник  $A_s \cdot J_{sc}$  перевищує допустиме значення більш ніж на 15%, то необхідно або збільшувати площі поперечного перерізу дроту і паза, зменшуючи розміри  $h_{ys}$  і  $b_{ts}$  і не перевищуючи допустимих значень  $B_{ys}$  і  $B_{ts}$ , або подовжити осердя статора, збільшуючи тим самим магнітний потік  $\Phi$  і зменшуючи кількість провідників в пазу  $z_{Qs}$ .

### *Розміри елементів обмотки статора*

Середній зубцевий (або пазовий) крок статора, мм,

$$\tau_{sav} = \frac{\pi \cdot (d_s + h_s)}{Q_s}.$$

Середня ширина катушки обмотки статора, мм,

$$b_{wav} = \tau_{sav} \cdot y_{Qs}.$$

Середня довжина однієї лобової частини катушки, мм,

$$l_{fh} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{wav} + 15.$$

Середня довжина витка обмотки, мм,

$$l_{w_{av}} = 2 \cdot (l_s + l_{fh}).$$

Довжина вильоту лобової частини обмотки, мм:

$$\text{при } h \leq 132 \text{ мм } l_{fs} = (0,19 + 0,1 \cdot p) \cdot b_{w_{av}} + 10,$$

$$\text{при } h \geq 160 \text{ мм } l_{fs} = (0,12 + 0,15 \cdot p) \cdot b_{w_{av}} + 10.$$

### **Питання для самостійного вивчення**

1. Від яких параметрів залежить вибір кількості пазів статора?
2. Ізоляція яких класів нагрівостійкості використовуються при проектуванні електричних машин?

## **ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3**

### **«Проектування ротора»**

**Ціль заняття.** Одержання практичних навичок щодо виконання проектування ротора.

Основною ознакою ротора проектованого двигуна є те, що він є короткозамкненим, причому короткозамкнена обмотка ротора виконується у вигляді литої алюмінієвої клітки.

#### *Повітряний проміжок між осердям статора і осердям ротора*

Довжина повітряного проміжку  $\delta$  має істотний вплив на розміри і характеристики асинхронного двигуна, що властиво і іншим електричним машинам.

При зменшенні проміжку зменшується МРС обмотки статора (зменшується струм неробочого ходу, переріз провідників і втрати потужності в ній) і збільшується коефіцієнт потужності. З іншого боку, при зменшенні проміжку збільшуються амплітуди вищих просторових гармонік магнітного поля в проміжку що, в свою чергу, приводить до збільшення додаткових втрат, додаткових (паразитних) моментів і магнітного шуму машин.



Надмірне зменшення проміжку потребує якісніших обробок і складання деталей і вузлів машини з метою забезпечення концентричності поверхні розточування статора і зовнішньої поверхні осердя ротора. Визначення повітряного проміжку машини з урахуванням перерахованих чинників є дуже складною задачею. Тому його розрахунок проводиться за емпіричними формулами, які враховують основні розмірні співвідношення асинхронного двигуна, а також досвід виробництва і експлуатації двигунів з конструкцією, аналогічною конструкції проектного двигуна.

В таблиці 3.1 приведено довжини повітряних проміжків  $\delta$  в сучасних асинхронних машинах, що виготовляються серійно і мають ступень захисту IP44, спосіб охолодження IC0141, потужність до 100 кВт. Як видно з таблиці, найменший проміжок, який можуть забезпечити технологія і обладнання, вживані при виробництві електродвигунів, дорівнює 0,25 мм.

*Зовнішній діаметр ротора, мм*

$$d_r = d_s - 2 \cdot \delta .$$

Довжина пакету осердя ротора  $l_r$ , мм, приймається такою самою, як і у осердя статора

$$l_r = l_s .$$

Таблиця 3.1 – Рекомендовані значення повітряного проміжку

Висота вісі обертання $h$ , мм	Довжина повітряного проміжку $\delta$ , мм			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
56	0,25	0,25	-	-
63	0,30	0,25	0,25	-
71	0,35	0,25	0,25	0,25
80	0,35	0,25	0,25	0,25
90	0,40	0,25	0,25	0,25
100	0,45	0,30	0,30	0,30
112	0,50	0,30	0,30	0,30
132	0,60	0,35	0,35	0,35
160	0,80	0,50	0,40	0,40

### *Кількість пазів короткозамкненого ротора*

Вибрані для статора і ротора кількості пазів залежать від кількості полюсів і від діаметра осердя, а значить, і від висоти вісі обертання. Вибір співвідношення кількості пазів статора ( $Q_s$ ) і кількості пазів ротора ( $Q_r$ ) повинен проводитися з урахуванням багатьох параметрів двигуна: мінімальні додаткові втрати потужності, відсутність провалів в механічній характеристиці, зменшені шуми і вібрації, необхідна перевантажувальна здатність, добрі пускові характеристики і ін.

З урахуванням сказаного в таблиці 3.2 надано рекомендації щодо вибору кількості пазів ротора, залежно від вже встановленої кількості пазів статора і кількості полюсів за наявності і відсутності скосу пазів ротора. Останній застосовують для зменшення впливу гармонійних зубцевого порядку та поліпшення віброакустичних характеристик двигуна.

Скіс пазів ротора виконують звичайно в межах одного пазового кроку статора [6], хоча є рекомендації, що скіс пазів складає один пазовий крок ротора [1]. Як приклад, в таблиці 3.3 наведено співвідношення пазів  $Q_s$  і  $Q_r$  в двигунах загального призначення серії 4А, які були встановлені практикою і перевірені численними випробуваннями дослідних зразків з різною висотою вісі обертання.

Таким чином, за даними таблиці 3.2 і таблиці 3.3 треба вибрати конкретну кількість пазів ротора  $Q_r$  для проектного двигуна.

Таблиця 3.2 – Рекомендована кількість пазів з короткозамкненою обмоткою

$2p$	Кількість пазів статора	Кількість пазів ротора	
		Пази без скосу	Пази зі скосом
2	12	9*, 15*	-
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22*	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	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	12	9*	15*
	18	10*, 14*	18*, 22*
	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), 51, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 55, 56, 64, 69, 71
6	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65

1. Зірочкою відмічені кількості пазів, вживані в основному в машинах малої потужності: з технологічних міркувань в них звичайно  $Q_r < Q_s$ .
2. У дужках приведені кількості пазів, при яких можливе підвищення вібрації двигуна.

Таблиця 3.3 – Рекомендовані співвідношення кількості пазів статора і кількості пазів ротора

Висота осі обертання $h$ , мм	Співвідношення $Q_s / Q_r$ при кількості полюсів			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
50-63	24/19	24/18	36/28	-
71	24/19	24/18	36/28	-
80-100	24/19	36/28	36/28	36/28
112-132	24/19	36/34	54/51	48/44
160	36/28	48/38	54/51	48/44

### Форма паза ротора

У двигунах загального призначення з висотою осі обертання  $h \leq 250$  мм звичайно застосовують напівзакриті пази ротора трапецеїдальної овальної

форми, які показано на рисунку 3.1. Радіуси  $r_{r1}$  і  $r_{r2}$  вибирають так, щоб ширина основної частини зубців  $b_{ir}$  впродовж висоти  $h_{r2}$  була однаковою.

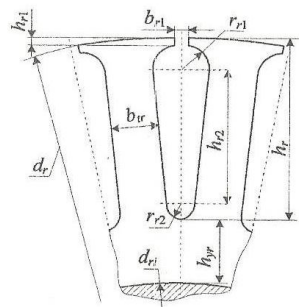


Рисунок 3.1 – Зубцево-пазова структура короткозамкненого ротора

Попереднє значення висоти паза  $h_r$  може бути узятє з рисунку 3.2, де дано її середнє значення для короткозамкненого ротора залежно від зовнішнього діаметра статора  $d_{se}$  при овальних напівзакритих пазах. Ротори, висота пазів яких перевищує 15 мм, умовно можуть бути віднесені до роторів з глибокими пазами. Тому при розрахунку пускових параметрів необхідно враховувати явище витіснення струму в стрижнях.

Ротор з глибокими пазами завжди має переваги над ротором з неглибокими пазами, оскільки дозволяє отримати задані пускові характеристики без погіршення характеристик робочого режиму. Проте, чим більше  $h_r$  тим менше висота спинки ротора  $h_{yr}$  і відповідно більше магнітна індукція в спинці  $B_{yr}$ . Якщо при перевірці індукція  $B_{yr} > 1,67$  Тл, то заздалегідь прийняту висоту паза  $h_r$  необхідно зменшити.

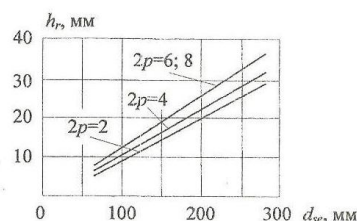


Рисунок 3.2 – До вибору висоти паза ротора

Внутрішній діаметр осердя ротора, мм, для висот осей обертання  $h$ , що дорівнюють 50 і 63 мм

$$d_{ri} \approx 0,19 \cdot d_{se}$$

а для висот осей обертання  $h \geq 71$  мм

$$d_{ri} \approx 0,23 \cdot d_{se}$$

Отримане тут значення діаметра  $d_{ri}$  підлягає уточненню після розрахунку вала на жорсткість.

Аксіальні вентиляційні канали в осерді ротора не використовують в двигунах з висотою осі обертання до 250 мм, тому що істотно збільшується магнітна індукція в спинці ротора.

Рекомендована розрахункова висота спинки ротора визначається емпіричними формулами, мм:

$$\text{при } h \leq 63 \text{ мм і } 2p = 2 \quad h_{yr} = 0,49 \cdot d_r - h_r,$$

$$\text{при } h \leq 63 \text{ мм і } 2p \geq 4 \quad h_{yr} = 0,4 \cdot d_r - h_r,$$

$$\text{при } h \geq 71 \text{ мм і } 2p = 2 \quad h_{yr} = 0,58 \cdot d_r - h_r,$$

$$\text{при } h \geq 71 \text{ мм і } 2p \geq 4 \quad h_{yr} = 0,38 \cdot d_r - h_r,$$

але у підсумку треба узгодити значення  $d_{ri}$  і  $d_{yr}$ , зважаючи на співвідношення

$$h_{yr} = \frac{d_r - d_{ri}}{2} - h_r.$$

*Магнітна індукція в спинці ротора, Тл*

$$B_{yr} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot K_{Fe} \cdot l_r \cdot h_{yr}}.$$

Отримане значення  $B_{yr}$  не повинно перевищувати 1,6 Тл.

*Зубцевий крок ротора, мм*

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot d_r}{Q_r}.$$

*Магнітна індукція в зубцях ротора  $B_{tr}$ , Тл*

Попереднє значення цієї індукції приймаємо за даними табл. 3.4

Таблиця 3.4 – Рекомендована магнітна індукція в зубцях ротора для двигунів із ступенем захисту IP44

Висота вісі обертання $h$ , мм	Кількість полюсів $2p$	Магнітна індукція в зубцях ротора $B_{tr}$ , Тл
50-132	2; 4; 6; 8	1,60-1,80
160-250	2 4; 6; 8	1,75-1,95 1,70-1,90

*Ширина зубця ротора, мм*

$$b_{tr} = \frac{B_{\delta} \cdot \tau_r}{B_{tr} \cdot K_{Fe}}$$

*Розміри напівзакритого паза ротора*

1) висота і ширина шліца

$h_{r1}$  від 0,5 до 0,75 мм       $b_{r1}$  від 1,0 до 1,5 мм

2) більший і менший радіуси, мм

$$r_{r1} = \frac{\pi \cdot (d_r - 2 \cdot h_{r1}) - Q_r \cdot b_{tr}}{2 \cdot (Q_r + \pi)};$$

$$r_{r2} = \frac{\pi \cdot (d_r - 2 \cdot h_r) - Q_r \cdot b_{tr}}{2 \cdot (Q_r - \pi)};$$

3) відстань між центрами дуг радіусів  $r_{r1}$  і  $r_{r2}$ , мм

$$h_{r2} = h_r - h_{r1} - r_{r1} - r_{r2};$$

4) площа поперечного перерізу паза  $S_{rn}$  (і одночасно стрижня  $S_{rc}$ ), мм<sup>2</sup>

$$S_{rn} = S_{rc} = 0,5 \cdot \pi \cdot (r_{r1}^2 + r_{r2}^2) + (r_{r1} + r_{r2}) \cdot h_{r2}.$$

Радіуси  $r_{r1}$  і  $r_{r2}$  визначені, виходячи з умов, що  $b_{rr} = const$ . Перевірку правильності їх визначення здійснюють за допомогою виразу

$$\pi \cdot h_{r3} - Q_r \cdot (r_{r1} - r_{r2}) \approx 0.$$

Розміри короткозамикального кільця литої алюмінієвої клітки (рис. 3.3):

1) поперечний переріз кільця,  $\text{мм}^2$

$$S_{fhr} = \frac{(0,35 \dots 0,45) \cdot Q_r \cdot S_{rn}}{2p};$$

2) висота кільця,  $\text{мм}$

$$h_{fhr} \approx (1,1 \dots 1,2) \cdot h_r;$$

3) довжина кільця,  $\text{мм}$

$$l_{fhr} = \frac{S_{fhr}}{h_{fhr}};$$

4) середній діаметр кільця,  $\text{мм}$

$$d_{fhr} = d_r - h_{fhr}.$$

Одночасно з кільцями відливають і вентиляційні лопатки в кількості  $n_{bl} \frac{Q_r}{2 \dots 3}$ . Довжина лопаток  $l_{bl}$  вибирається декілька меншою порівняно з довжиною лобових частин обмотки статора.

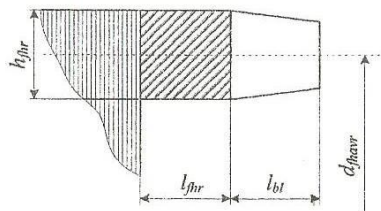


Рисунок 3.3 – Переріз коротко замикального кільця литої алюмінієвої клітки

### Питання для самостійного вивчення

1. На що впливає довжина повітряного проміжку  $\delta$ ?
2. Які переваги дає ротор з глибокими пазами?

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

### «Перевірний розрахунок»

**Ціль заняття.** Одержання практичних навичок виконання розрахунків магніторушійної сили і струму обмотки статора при неробочому ході.

Перевірний розрахунок дозволяє визначити відповідність характеристик проекрованої машини вимогам технічного завдання і стандартам.

Вихідними даними до перевірного розрахунку є значення величин, які отримані при виборі головних розмірів, проектуванні статора і ротора.

#### *Розрахунок магнітного кола*

Мета розрахунку – визначення магніторушійної сили (МРС) і струму обмотки статора при неробочому ході для забезпечення намагнічування двигуна – створення необхідного магнітного поля. У подальшому це потрібно для визначення струму обмотки статора при номінальному навантаженні, а також при інших рівнях навантаження.

Оскільки магнітне коло асинхронної машини симетричне, можна обмежуватися розрахунком МРС на один полюс. При цьому магнітне коло розбивається на ряд ділянок: повітряний проміжок, зубці статора, спинка статора, зубці ротора і спинка ротора. При розрахунку приймається я допущення, що в межах кожної ділянки магнітна індукція розподілена рівномірно і при цьому розрахунок на ділянках ведеться по умовній середній довжині силової лінії.

У зубцях статора і ротора правильно спроектованого двигуна магнітна індукція зазвичай вище, ніж в їхніх спинках. У наслідок цього зубці насичуються більшою мірою, що викликає сплющення кривої розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку. Крім того, довжина шляху



магнітного потоку в спинці по краях і по середині полюсного кроку різна, відповідно нерівномірно розподіляється і індукція. Ці фактори враховані у відповідних таблицях залежності напруженості магнітного поля від індукції –  $H(B)$ , які використовуються при розрахунку магнітного кола.

Наявність пазів на статорі і роторі збільшує магнітний опір повітряного проміжку, що враховується введенням поправочного коефіцієнта повітряного проміжку  $K_C$  (вихідна його назва – коефіцієнт Картера).

При значних індукціях в зубцях ( $B > 1,8$  Тл) частина магнітного потоку проходить через паз, знижуючи дійсне значення індукції в зубці, тому напруженість магнітного поля в цьому випадку необхідно визначити з урахуванням зубцевого коефіцієнта.

Слід також відзначити, що для зубців статора і ротора з рівновеликим по всій висоті поперечним перерізом (при  $h = 50 \dots 160$  мм) напруженість магнітного поля знаходиться по індукції, розрахованій в перерізі зубця на  $1/3$  його висоти, відраховуючи від повітряного проміжку (див. рис. 3.1 і рис. 4.1).

Розрахунок магнітного кола асинхронного двигуна проводиться в наступному порядку.

Коефіцієнт повітряного проміжку:

$$K_C = K_{Cs} \cdot K_{Cr},$$

де  $K_{Cs}$  і  $K_{Cr}$  – коефіцієнти, які враховують зубчастість статора і ротора:

$$K_{Cs} = \frac{\tau_s + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_s}{b_{s1}}}{\tau_s - b_{s1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_s}{b_{s1}}};$$

$$K_{Cr} = \frac{\tau_r + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_r}{b_{r1}}}{\tau_r - b_{r1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_r}{b_{r1}}}.$$

Магнітна напруга повітряного проміжку, А

$$F_{ts} = 0,8 \cdot \delta \cdot K_C \cdot B_{ts} \cdot 10^3.$$

Напруженість магнітного поля в зубцях статора  $H_{ts}$ , А/см, при  $B_{ts} \leq 1,8$  Тл вибираємо за таблицею 4.1, при  $B_{ts} > 1,8$  Тл – за рисунком 4.1 з урахуванням величини зубцевого коефіцієнта

$$K_{ts \frac{1}{3}} = \frac{\tau_{s \frac{1}{3}}}{b_{ts} \cdot K_{Fe}} - 1,$$

де  $\tau_{s \frac{1}{3}}$  – зубцевий крок на  $\frac{1}{3}$  висоти зубця, мм

$$\tau_{s \frac{1}{3}} = \frac{\pi \cdot \left( d_s + \frac{2}{3} \cdot h_s \right)}{Q_s}.$$

Середня довжина шляху магнітного потоку в зубці статора, мм

$$l_{mts} = h_s.$$

Магнітна напруга зубців статора, А

$$F_{ts} = 0,1 \cdot H_{ts} \cdot l_{mts}.$$

Напруженість магнітного поля в спинці статора  $H_{ys}$ , А/см, при  $2p = 2$  і  $B_{ys} \leq 1,4$  Тл, а також при  $2p \geq 4$  вибирається з таблиці 4.2. При  $2p = 2$  і  $B_{ys} > 1,4$  Тл значення  $B_{ys}$  зменшується на 0,4 Тл і  $H_{ys}$  вибирається за таблицею 4.3.

Таблиця 4.1 – Таблиця намагнічування для зубців машин змінного струму

$B$ , Тл	$H$ , А/см									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 2013										
0,4	1,24	1,27	1,3	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,5
0,5	1,54	1,57	1,6	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,8	1,84
0,6	1,88	1,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,24
0,7	2,23	2,26	2,29	2,33	2,36	2,40	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	2,56	2,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,70	3,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,30	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	4,95	5,04	5,14	5,24	5,33	5,63	5,74	5,84	5,95
1,4	5,86	5,98	6,10	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	9,96
1,5	7,09	7,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	8,5	8,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,2	10,5	10,8	11,1
1,7	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0	14,1	14,8
1,8	15,2	15,7	16,2	16,7	17,2	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 2312										
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,71
0,5	1,74	1,77	1,80	1,84	1,86	1,90	1,92	1,96	1,98	2,02
0,6	2,04	2,09	2,13	2,16	2,21	2,24	2,29	2,33	2,37	2,41
0,7	2,45	2,49	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87
0,8	2,92	2,97	3,02	3,06	3,11	3,16	3,22	3,26	3,31	3,37
0,9	3,42	3,47	3,53	3,60	3,66	3,72	3,79	3,84	3,90	3,96
1,0	4,03	4,09	4,17	4,25	4,33	4,40	4,50	4,60	4,70	4,77
1,1	4,88	4,97	5,09	5,17	5,27	5,37	5,47	5,59	5,70	5,82
1,2	5,93	6,02	6,13	6,26	6,38	6,51	6,63	6,77	6,95	7,10
1,3	7,24	7,38	7,55	7,70	7,90	8,04	8,20	8,40	8,57	8,79
1,4	8,97	9,17	9,36	9,55	9,77	10,0	10,2	10,4	10,6	10,9
1,5	11,2	11,5	11,7	12,1	12,4	12,7	13,1	13,3	13,7	14,1
1,6	14,5	14,9	15,3	15,7	16,1	16,5	16,9	17,5	17,9	18,4
1,7	19,0	19,4	20,0	20,7	21,4	22,2	23,0	23,8	25,0	26,0
1,8	27,0	28,0	29,2	30,5	32,2	33,3	34,9	36,1	37,1	40,0
Сталь 2411										
0,4	0,72	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82
0,5	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
0,6	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,04
0,7	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20
0,8	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40
0,9	1,42	1,44	1,47	1,49	1,51	1,55	1,58	1,60	1,63	1,65
1,0	1,68	1,71	1,75	1,77	1,80	1,84	1,88	1,91	1,96	2,00
1,1	2,04	2,07	2,12	2,16	2,22	2,27	2,32	2,37	2,42	2,47
1,2	2,54	2,59	2,65	2,72	2,77	2,84	2,91	2,98	3,07	3,16
1,3	3,23	3,33	3,41	3,51	3,61	3,72	3,83	3,94	4,04	4,14
1,4	4,25	4,32	4,61	4,80	4,97	5,18	5,37	5,54	5,73	5,96
1,5	6,22	6,48	6,73	7,00	7,28	7,56	7,95	8,28	8,59	8,90
1,6	9,32	9,76	10,2	10,7	11,3	11,8	12,6	13,5	14,4	15,2
1,7	16,3	17,4	18,7	20,2	21,3	23,0	24,5	26,3	28,3	30,7
1,8	31,9	34,1	35,9	38,3	41,0	44,0	46,0	48,0	51,0	54,0

Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці статора, мм

$$l_{mys} = \frac{\pi \cdot (d_{se} - h_{ys})}{4 \cdot p}.$$

Магнітна напруга спинки статора, А

$$F_{ys} = 0,1 \cdot H_{ys} \cdot l_{mys}.$$

Напруженість магнітного поля в зубцях ротора  $H_{tr}$ , А/см, при  $B_{tr} \leq 1,8$ Тл вибирається за таблицею 4.1; при  $B_{tr} > 1,8$ Тл – за рисунком 4.1 з урахуванням зубцевого коефіцієнта

$$K_{tr1/3} = \frac{\tau_{r1/3}}{b_{tr} \cdot K_{Fe}},$$

де  $\tau_{r1/3}$  – зубцевий крок на 1/3 висоти зубця, мм

$$\tau_{r1/3} = \frac{\pi \left[ d_r - \frac{4}{3} \cdot h_r \right]}{Q_r}$$

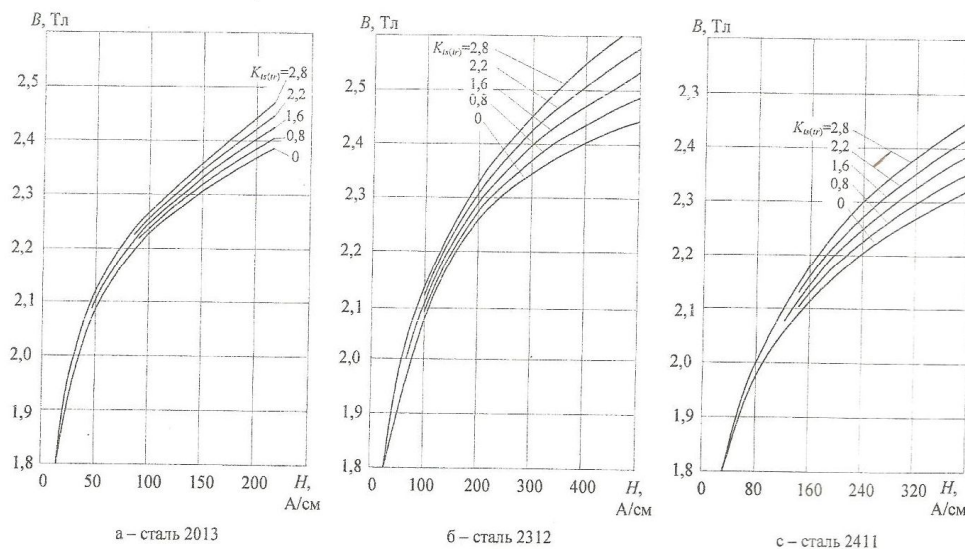


Рисунок 4.1 – Криві намагнічування для зубців машин змінного струму

Таблиця 4.2 – Таблиця намагнічування для спинок статора і ротора машин змінного струму

B, Тл	H, А/см									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 2013										
0,8	1,24	1,26	1,29	1,32	1,35	1,38	1,40	1,43	1,46	1,49
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,68	1,71	1,74	1,77	1,81
1,0	1,85	1,88	1,91	1,95	1,99	2,03	2,06	2,09	2,13	2,17
1,1	2,21	2,25	2,29	2,33	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57
1,2	2,62	2,67	2,72	2,77	2,83	2,89	2,95	3,01	3,07	3,13
1,3	3,20	3,27	3,34	3,41	3,49	3,57	3,65	3,73	3,82	3,91
1,4	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,5	5,20	5,42	5,64	5,86	6,08	6,30	6,54	6,78	7,02	7,26
1,6	7,50	7,88	8,26	8,64	9,02	9,40	9,82	10,2	10,7	11,1
1,7	11,5	12,2	12,9	13,6	14,3	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,8	20,0	21,6	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 2312										
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	2,52	2,55	2,60	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,00	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,67	3,74	3,82	3,90	3,98
1,2	4,10	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,85	6,00	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,17	7,40	7,63	7,89	8,15	8,43	8,70
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	28,4	29,8	31,3	32,9
1,8	34,6	36,3	38,0	39,7	41,4	43,1	44,9	46,7	48,5	50,4
Сталь 2411										
0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94
0,9	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14
1,0	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43
1,1	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,67	1,72	1,76	1,82	1,88
1,2	1,92	1,98	2,04	2,10	2,16	2,22	2,30	2,38	2,46	2,60
1,3	2,72	2,88	3,00	3,16	3,30	3,40	3,58	3,70	3,86	3,99
1,4	4,10	4,40	4,60	4,90	5,30	5,70	6,10	6,60	7,10	7,70
1,5	8,20	8,90	9,60	10,3	11,0	11,7	12,3	13,1	14,0	14,8
1,6	15,6	16,4	17,3	18,2	19,2	20,0	21,0	22,6	24,4	26,0
1,7	28,0	29,6	31,0	32,6	34,0	35,8	37,4	39,0	41,0	43,0
1,8	45,0	47,0	50,0	53,0	55,0	58,0	61,0	64,0	68,0	72,0

Таблиця 4.3 – Основна таблиця намагнічування

В, Тл	H, А/см									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 2013										
1,0	1,0	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,80
1,5	6,20	6,70	7,80	8,90	10,0	11,3	12,4	13,5	14,6	15,8
1,6	17,0	18,6	20,2	21,8	23,4	25,0	27,0	28,0	30,0	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66,0
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
Сталь 2312										
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,60	4,70	4,80	5,00	5,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	38,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	82,0	89,0	94,0	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 2411										
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,44	2,52	2,60	2,69	2,77	2,86
1,1	2,95	3,04	3,14	3,24	3,34	3,44	3,55	3,66	3,77	3,88
1,2	3,99	4,11	4,23	4,35	4,47	4,60	4,73	4,86	5,00	5,40
1,3	5,85	6,30	6,80	7,35	7,95	8,60	9,30	10,0	10,7	11,5
1,4	12,3	13,2	14,2	15,2	16,3	17,5	18,7	20,1	21,6	23,2
1,5	25,0	26,8	28,7	30,8	33,0	35,4	38,0	40,9	43,8	47,0
1,6	50,0	53,8	57,6	62,0	66,5	71,2	76,5	82,0	88,0	94,0
1,7	100	105	110	115	120	125	131	137	143	149
1,8	156	162	168	175	183	191	200	209	219	229

Середня довжина шляху магнітного потоку в зубці ротора, мм  
(див. рис. 4.1):

$$l_{mr} = h_r - 0,2 \cdot r_{r2}.$$

Магнітна напруга зубців ротора, А

$$F_{tr} = 0,1 \cdot H_{tr} \cdot l_{mr}.$$

Напруженість магнітного поля в спинці ротора  $H_{yr}$ , А/см:

при  $2p = 2$  вибирається з таблиці 4.2, при  $2p \geq 4$  – з таблиці 4.3.

Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці ротора  
(див. рис. 4.1), мм:

при  $2p = 2$

$$l_{myr} = h_{yr};$$

при  $2p \geq 4$

$$l_{myr} = \frac{\pi \cdot (d_{ri} + h_{yr})}{4 \cdot p}.$$

Магнітна напруга спинки ротора, А

$$F_{yr} = 0,1 \cdot H_{yr} \cdot l_{myr}.$$

МРС обмотки статора на один полюс, А

$$\sum F = F_{\delta} + F_{ts} + F_{ys} + F_{tr} + F_{yr}.$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола

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

Зазвичай в асинхронних двигунах цей коефіцієнт  $k_{\mu}$  знаходиться в межах від 1,25 до 1,45.

Складова намагнічу вального струму статора, А

$$I_{s\mu} = \frac{2,22 \cdot p \cdot \sum F}{m_s \cdot N_s \cdot K_{Ws}},$$

у відносних одиницях

$$I_{s\mu*} = \frac{I_{s\mu}}{I_{sN}}.$$

Головний індуктивний опір, Ом

$$X_{\mu} = \frac{E_s}{I_{s\mu}},$$

де  $E_s = K_E \cdot U_{sN}$  ( $K_E = 0,96 - 97$  - див. п.2.4);

у відносних одиницях

$$X_{\mu*} = \frac{X_{\mu} \cdot I_{sN}}{U_{sN}}.$$

#### *Визначення активних і індуктивних опорів обмоток двигуна*

Визначення активних і індуктивних опорів як параметрів схеми заміщення необхідне для розрахунку режимів неробочого ходу і навантаження, а також робочих і пускових характеристик двигуна.

Активні опори обмоток, Ом, розраховуються для температури  $\theta_a = 20^{\circ}C$ .

$$R_{\theta a} = \rho_{20^{\circ}C} \frac{l_c}{S_c},$$

де  $\rho_{20^{\circ}C}$  – питомий електричний опір провідника при температурі  $20^{\circ}C$ ;

$l_c$  – довжина провідника, м;

$S_c$  – площа перерізу провідника,  $мм^2$ .

Потім активні опори приводять до стандартної робочої – розрахункової температури шляхом множення на температурний коефіцієнт  $k_{\theta}$ .

Прийняті відповідно ГОСТ 183 розрахункові температури залежно від класу ізоляції наведено в таблиці 4.4. Там же надані рекомендовані температурні коефіцієнти для міді  $k_{\theta Cu}$ , з якої виконується обмотка статора асинхронного двигуна, а також для литого алюмінію  $k_{\theta Al}$ , з якого виконується короткозамкнена обмотка його ротора.

Таблиця 4.4 – Температурні коефіцієнти для активних опорів використовуваних залежно від класу ізоляції

Прийнятий клас ізоляції		<i>B</i>	<i>F</i>
Допустима температура нагрівостійкості, °C		130	155
Розрахункова температура для активних опорів, °C		75	115
Температурний коефіцієнт для	Міді $k_{\theta Cu}$	1,22	1,38
	Литого алюмінію $k_{\theta Al}$	1,24	1,41

Питомі опори при базовій температурі  $\theta_a = 20^{\circ}C$  приймаються такі: для міді  $\rho_{Cu 20^{\circ}C} = \frac{1}{57}$  Ом·мкм, для алюмінію  $\rho_{Al 20^{\circ}C} = \frac{1}{27}$  Ом·мкм. Хоча треба додати, що значення  $\rho_{Al 20^{\circ}C}$  і  $k_{\theta Al}$  мають і інші варіанти, залежно від конкретно обраної марки алюмінію і етапу технологічного циклу. Приміром, після заливки алюмінію в паз ротора його питомий опір ще декілька підвищується.

Розрахунок індуктивних опорів обмоток проводиться шляхом умовного розбиття магнітного поля розсіювання на три складові: пазове, диференціальне і розсіювання лобових частин обмоток. Для кожної з складових знаходяться коефіцієнти магнітної провідності, потім вони підсумовуються і визначається індуктивний опір розсіювання фази обмотки.

Активний опір фазної обмотки статора при 20°C, Ом

$$R_{s\theta a} = \frac{\rho_{Cu 20^{\circ}C} \cdot N_s \cdot l_{wav}}{a_s \cdot N_c \cdot S_{sc}} \cdot 10^{-3}.$$

Активний опір обмотки статора, приведений до робочої температури, Ом

$$R_s = k_{\theta Cu} \cdot R_{s\theta a}.$$



Активний опір обмотки ротора

Активний опір стрижня клітки ротора, Ом

$$R_{r\alpha 1} = \frac{\rho_{Al 20^{\circ}C} \cdot l_r}{S_{rc}} \cdot 10^{-3}.$$

Коефіцієнт зведення струму коротко замикального кільця до струму стрижня ротора:

$$\text{при } \frac{\tau_r}{2p} \leq 6 \quad K_{fhr} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_r}\right);$$

$$\text{при } \frac{\tau_r}{2p} > 6 \quad K_{fhr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{Q_r}.$$

Опір короткозамкнених кілець, зведений до струму стрижня, Ом

$$R_{r\alpha 2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_{Al 20^{\circ}C} \cdot d_{favr}}{Q_r \cdot S_{fhr} \cdot K_{fhr}^2} \cdot 10^{-3}.$$

Центральний кут скосу пазів, рад

$$\alpha_{sq} = \frac{2 \cdot p \cdot \tau_s \cdot \beta_{sq}}{d_s},$$

де  $\beta_{sq}$  – відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого кроку статора

$$\beta_{sq} = \frac{b_{sq}}{\tau_s},$$

а ширина дуги скосу в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором при  $h \leq 160$  береться рівною одному зубцевому кроку статора

$$b_{sq} = \tau_s.$$

Коефіцієнт скосу пазів ротора  $K_{sq}$  вибирається за рисунком 5.2 залежно від  $\alpha_{sq}$ .

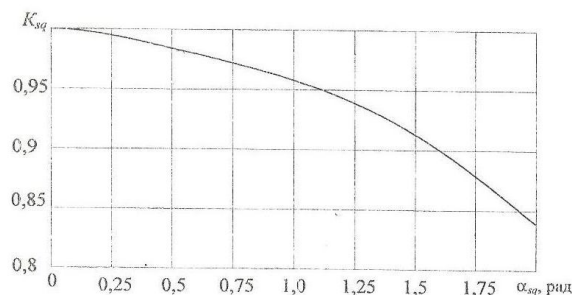


Рисунок 4.2 – Визначення коефіцієнту скосу пазів ротора

Коефіцієнт зведення опору обмотки ротора до обмотки статора

$$K_{sr} = \frac{4 \cdot m_s}{Q_s} \cdot \left( \frac{N_s \cdot K_{ws}}{K_{sq}} \right)^2.$$

Зведений активний опір обмотки ротора при 20°C, Ом

$$R'_{r\theta a} = K_{sr} \cdot (R_{r\theta a1} + R_{r\theta a2}).$$

Зведений активний опір обмотки ротора при робочій температурі, Ом

$$R'_r = k_{\theta Al} \cdot R'_{r\theta a}.$$

Індуктивний опір фази обмотки статора

Коефіцієнт провідності пазового розсіяння (рис. 4.3)

$$\lambda_{sn} = \frac{h_{s4}}{3b_{s2}} + \frac{3h_{s2}}{b_{s2} + 2b_{s1}} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{h_{s3}}{b_{s2}}.$$

Тут необхідні розміри паза беруться на основі рисунка 3.1 і подальшої детальної проробки його конструкції та заповнення провідниками і ізоляцією.

У іншому випадку можна скористатися орієнтованими значеннями:

$$h_{s3} = 0,6 \text{ мм};$$

$$\text{при } h = 50 - 132 \text{ мм: } h_{s2} = 0,6 \text{ мм}; \quad h_{s5} = 0;$$

$$\text{при } h = 160 \text{ мм: } h_{s2} = 1,0 \text{ мм}; \quad h_{s5} = 0,4 \text{ мм};$$

$$\text{у підсумку } h_{s4} = h_s - h_{s1} - h_{s2} - h_{s3} - h_{s5}.$$

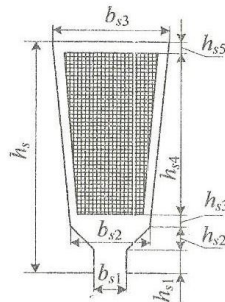


Рисунок 4.3 – Ескіз паза статора до розрахунку пазового розсіяння

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{sd} = 0,9 \cdot \frac{(\tau_s \cdot K_{ws})^2 \cdot K_{rdm} \cdot K_{ns} \cdot K_{ds}}{\delta \cdot K_c},$$

де  $K_{ds}$  – коефіцієнт диференціального розсіювання статора, рівний відношенню сумарної ЕРС, від вищих гармонік магнітного поля статора до ЕРС від першої гармоніки, визначається за таблицею 4.5;

$K_{rdm}$  – коефіцієнт, що враховує демпфувальну реакцію струмів, наведених в короткозамкненій обмотці ротора вищими гармоніками поля статора, визначається за таблицею 4.6.

Таблиця 4.5 – Визначення коефіцієнту диференціального розсіювання статора

$q_s$	2	3	4	5	6
$K_{ds}$	0,0285	0,0141	0,0089	0,0065	0,0052

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки статора

$$\lambda_{sfh} = 0,34 \cdot \frac{q_s}{l_s} \cdot (l_{fh} - 0,64 \cdot \beta_Q \cdot \tau_p);$$

де  $\tau_p$  – полюсний крок двигуна по розточці статора, мм

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d_s}{2p};$$

$\beta_Q$  – скорочення кроку обмотки статора: при одношаровій обмотці з діаметральним кроком  $\beta_Q = 1$ .

Таблиця 4.6 – Визначення коефіцієнту демпфувальної реакції струмів обмоток ротора

$q_s$	Значення $K_{rdm}$ при $Q_r / p$					
	10	15	20	25	30	35
2	$\frac{0,99}{0,94}$	$\frac{0,95}{0,87}$	-	-	-	-
3	$\frac{0,98}{0,92}$	$\frac{0,93}{0,87}$	$\frac{0,88}{0,84}$	$\frac{0,85}{0,78}$	-	-
4	-	$\frac{0,90}{0,81}$	$\frac{0,84}{0,77}$	$\frac{0,8}{0,75}$	$\frac{0,77}{0,72}$	-
5	-	-	-	$\frac{0,75}{0,69}$	$\frac{0,72}{0,67}$	$\frac{0,70}{0,65}$

Значення  $K_{rdm}$  у чисельнику – при скосі пазів ротора  $b_{sq} = \tau_r$ , в знаменнику – за відсутністю скосу.

Сумарний коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора

$$\lambda_{\sigma s} = \lambda_{sn} + \lambda_{sd} + \lambda_{sfh}$$

Індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора, Ом

$$X_{\sigma s} = 1,58 \cdot \frac{f_s \cdot l_s \cdot N_s^2 \cdot \lambda_{\sigma s}}{p \cdot q_s \cdot 10^8}.$$

Індуктивний опір обмотки ротора

Коефіцієнт провідності пазового розсіювання для овального напівзакритого паза (див. рис. 4.1):

$$\lambda_{rn} = \frac{h_{r1}}{b_{r1}} + \frac{h_{r2} + 0,8 \cdot r_{r2}}{6 \cdot r_{r1}} \left( 1 - \frac{\pi \cdot r_{r1}^2}{2 \cdot S_{rc}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{r1}}{4r_{r1}}.$$

Кількість пазів ротора на полюс і фазу статора

$$q_r = \frac{Q_r}{2 \cdot p \cdot m_s}.$$

Коефіцієнт провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{rd} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \left( \frac{Q_r}{6 \cdot p} \right)^2 K_{dr}}{\delta \cdot K_C},$$

де  $K_{dr}$  – коефіцієнт диференціального розсіювання ротора вибирається за рисунком 4.4

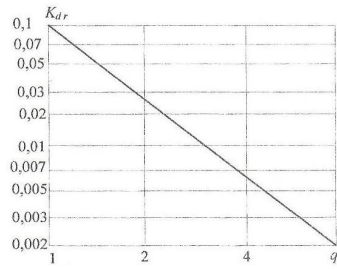


Рисунок 4.4 – Визначення коефіцієнту диференціального розсіювання ротора

Коефіцієнт провідності розсіювання коротко замикальних кілець

$$\lambda_{r\,fh} = \frac{2,9 \cdot d_{fhavr}}{Q_r \cdot l_r \cdot K_{fhr}^2} \cdot \lg \left( \frac{2,35 \cdot d_{fhavr}}{h_{fhr} + l_{fhr}} \right).$$

Коефіцієнт провідності розсіювання скосу пазів

$$\lambda_{r\,sq} = \frac{\tau_r \cdot \beta_{sqr}^2}{9,5 \cdot \delta \cdot K_C \cdot \kappa_\mu},$$

де  $\beta_{sqr}$  – відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого кроку ротора

$$\beta_{sqr} = \beta_{sq} \cdot \frac{\tau_s}{\tau_r}.$$

Сумарний коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_{\sigma r} = \lambda_{rn} + \lambda_{rd} + \lambda_{r\,fh} + \lambda_{r\,sq}.$$

Індуктивний опір обмотки ротора, Ом

$$X_{\sigma r} = 7,9 \cdot f_s \cdot l_r \cdot \lambda_{\sigma r} \cdot 10^{-9}.$$

Зведений індуктивний опір обмотки ротора, Ом

$$X'_{\sigma r} = K_{sr} \cdot X_{\sigma r}.$$

У правильно спроектованій машині зазвичай співвідношення  $\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$

знаходиться у межах від 0,7 до 1,0.

Опори обмоток перетвореної Г-образної схеми заміщення з винесеним намагнічувальним контуром (рис. 4.5).

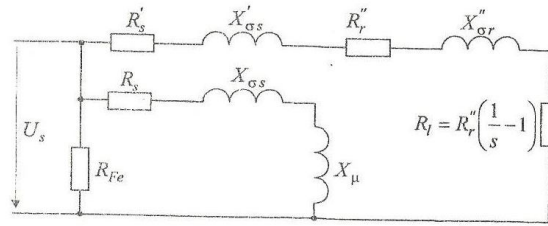


Рисунок 4.5 – Схема заміщення зведеного асинхронного двигуна

Коефіцієнт розсіяння статора

$$k_{\sigma s} = X_{\sigma s} / X_{\mu}.$$

Коефіцієнт опору статора

$$C_s = \frac{R_s}{X_{\sigma s} + X_{\mu}}.$$

Перетворені опори обмоток, Ом:

$$R'_s = R_s; \quad X'_{\sigma s} = X_{\sigma s} \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot \left( 1 + \frac{R_s \cdot C_s}{X_{\sigma s}} \right);$$

$$R''_r = R'_r \cdot (1 + k_{\sigma s})^2 \cdot (1 + C_s^2); \quad X''_{\sigma r} = X'_{\sigma r} \cdot (1 + k_{\sigma s})^2 \cdot (1 + C_s^2).$$

Якщо  $C_s \leq 0,1$ , можна використовувати спрощені вирази:

$$R'_s = R_s; \quad X'_{\sigma s} = X_{\sigma s} \cdot (1 + k_{\sigma s}); \quad R''_r = R'_r \cdot (1 + k_{\sigma s})^2; \quad X''_{\sigma r} = X'_{\sigma r} \cdot (1 + k_{\sigma s})^2.$$

Якщо  $k_{\mu} \geq 1,7$  і одночасно  $k_{\sigma s} \geq 0,05$ , то визначається величина ЕРС при неробочому ході, В

$$E_{so} = \frac{U_{sN}}{(1 + k_{\sigma s}) \cdot \sqrt{1 + C_s^2}}.$$

У випадку, якщо  $E_{so}$  відрізняється від  $E_s = K_E \cdot U_{sN}$  більш ніж на 3%, то проводиться повторний розрахунок магнітного кола при магнітних індукціях в окремих ділянках магнітопровода, змінених пропорційно відношенню  $E_{so} / E_s$ .

### *Режим неробочого ходу*

У режимі неробочого ходу повинні бути визначені струм і втрати потужності, а також коефіцієнт потужності, які потрібні для подальших розрахунків асинхронного двигуна.

Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні, А

$$I_{s\mu s} = \frac{U_{sN}}{x_{\mu} \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot (1 + C_s^2)}.$$

Електричні втрати в обмотці статора при синхронному обертанні, Вт

$$P_{el\mu} = m_s \cdot I_{s\mu s}^2 \cdot R_s' \cdot (1 + C_s^2).$$

Магнітні втрати в окремих елементах (е) осердя статора (зубцях і спинці) визначаються на основі загального виразу, Вт

$$P_{mag e} = K_{mag} \cdot p_{1/50} \cdot \left( \frac{f_s}{50} \right) \cdot B_e^2 \cdot m_{Fee},$$

де  $K_{mag}$  – поправочний коефіцієнт, враховуючий збільшення магнітних втрат через різні технологічні пошкодження листів осердя в процесі його виготовлення, для машин змінного струму приймається  $K_{mag} = 1,7$ ;

$p_{1/50}$  – питомі магнітні втрати, які визначені експериментально при частоті 50Гц і магнітній індукції 1Тл;

$\beta_f$  – емпіричний показник ступеню;

$B_e$ ,  $m_{Fee}$  - магнітна індукція і маса сталі конкретного елемента осердя.

Для сталі 2013  $p_{1/50} = 2,6$  Вт/кг і  $\beta_f = 1,5$ ; для сталі 2312  $p_{1/50} = 1,75$  Вт/кг і  $\beta_f = 1,4$ ; для сталі 2411  $p_{1/50} = 1,6$  Вт/кг і  $\beta_f = 1,3$ .

Розрахункова маса сталі зубців статора, кг

$$m_{Fets} = 7,8 \cdot Q_s \cdot b_{ts} \cdot h_s \cdot l_s \cdot K_{Fe} \cdot 10^{-6}$$

Розрахункова маса сталі зубців статора, кг

$$m_{Fey_s} = 7,8 \cdot Q_s \cdot (d_{se} - h_{ys}) \cdot h_{ys} \cdot l_s \cdot K_{Fe} \cdot 10^{-6}$$

Магнітні втрати в зубцях статора при  $f_s = 50$  Гц і вказаних значеннях  $p_{1/50}$

і  $K_{mag}$ , Вт

для сталі 2013

$$P_{magts} = 4,4 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets}$$

для сталі 2312

$$P_{magts} = 3,0 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets}$$

для сталі 2411

$$P_{magts} = 2,7 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets}$$

Магнітні втрати в спинці статора при  $f_s = 50$  Гц і вказаних значеннях  $p_{1/50}$

і  $K_{mag}$ , Вт

для сталі 2013

$$P_{magys} = 4,4 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets}$$

для сталі 2312

$$P_{magys} = 3,0 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets}$$

для сталі 2411

$$P_{magys} = 2,7 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets}$$

Сумарні магнітні втрати в осерді статора з урахуванням додаткових втрат, Вт

$$P_{mags} = P_{magts} \cdot \left[ 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{\tau_s}{10} \cdot (K_C - 1)^2} \right] + P_{magys}$$



Механічні втрати при ступені захисту IP44 і способі охолодження IC0141, Вт

$$P_{mec} = K_{mec} \cdot \left( \frac{n_s}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{d_{se}}{100} \right)^4,$$

де  $K_{mec}$  – коефіцієнт, який має значення  $K_{mec} = 1,3 \cdot \left( 1 - \frac{d_{se}}{1000} \right)$  при  $2p = 2$  і  $K_{mec} = 1$  при  $2p \geq 4$ .

Активна складова струму неробочого ходу, А

$$I_{sao} = \frac{P_{el\mu} + P_{mags} + P_{mec}}{m_s U_s}.$$

Струм неробочого ходу, А

$$I_{so} = \sqrt{I_{sao}^2 + I_{\mu s}^2}.$$

Коефіцієнт потужності при неробочому ході

$$\cos \varphi_o = \frac{I_{sao}}{I_{so}}.$$

### *Параметри і характеристики номінального режиму роботи*

У теперішній час переважним є аналітичний спосіб розрахунку номінального режиму і робочих характеристик асинхронних машин, заснований на використанні Г-образної схеми заміщення (рис. 5.5), що дозволяє широко використовувати ЕОМ в процесі проектування.

Активний опір короткого замикання, Ом

$$R_k = R'_s + R''_r.$$

Індуктивний опір короткого замикання, Ом

$$X_k = X'_{\sigma s} + X''_{\sigma r}.$$

Повний опір короткого замикання, Ом

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}.$$

Додаткові втрати в номінальному режимі, Вт ( $P_N$  в кВт)

$$P_{ad} = P_{ad\,nom} = 0,005 \cdot P_N \cdot \frac{10^3}{\eta_N}.$$

Механічна потужність двигуна, Вт

$$P_m = P_N \cdot 10^3 + P_{mec} + P_{ad}.$$

Повний опір схеми заміщення, Ом

$$Z_l = \sqrt{(R_l + R_k)^2 + X_k^2},$$

де  $R_l$  – опір заміщення (рис. 4.5), який імітує навантаження двигуна, Ом

$$R_l = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2 \cdot P_m} - R_k + \sqrt{\left( \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2 \cdot P_m} - R_k \right)^2 - Z_k^2}.$$

Ковзання у номінальному режимі

$$s_N = \frac{1}{1 + R_l / R_r'}.$$

Номінальна частота обертання, об/хв

$$n_N = n_s \cdot (1 - s_N).$$

Активна складова струму статора при синхронному обертанні, А

$$I_{sas} = \frac{P_{el\mu} + P_{mags}}{m_s \cdot U_{sN}}.$$

Зведений струм ротора, А

$$I_r'' = U_{sN} / Z_l.$$

Активна складова струму статора, А

$$I_{sa} = I_{sas} + I_r'' \cdot \left( \frac{(R_l + R_k) \cdot (1 - C_s^2) + 2 \cdot X_k \cdot C_s}{Z_l \cdot (1 + C_s^2)} \right).$$

Реактивна складова струму статора, А

$$I_{s\mu} = I_{s\mu s} + I_r'' \cdot \left( \frac{X_k \cdot (1 - C_s^2) - 2 \cdot (R_l + R_k) \cdot C_s}{Z_l \cdot (1 + C_s^2)} \right).$$

Фазний струм статора, А

$$I_{sN} = \sqrt{I_{sa}^2 + I_{s\mu}^2}.$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_N = \frac{I_{sa}}{I_{sN}}.$$

Лінійне навантаження статора, А/см

$$A_s = \frac{10 \cdot I_{sN} \cdot z_{Qs}}{a_s \cdot \tau_s}.$$

Густина струму в обмотці статора, А/мм<sup>2</sup>

$$J_{sc} = \frac{I_{sN}}{N_c \cdot S_{sc} \cdot a_s}.$$

Лінійне навантаження ротора, А/см

$$A_r = \frac{A_s \cdot I_r'' \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot K_{ws} \cdot \sqrt{1 + C_s^2}}{I_{sN} \cdot K_{wr} \cdot K_{sq}},$$

де  $K_{wr}$  – обмотковий коефіцієнт короткозамкненого ротора,  $K_{wr} = 1$ .

Струм в стрижні ротора, А

$$I_{r1} = \frac{2 \cdot m_s \cdot N_s \cdot K_{ws} \cdot I_r'' \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot \sqrt{1 + C_s^2}}{Q_r \cdot K_{sq}}.$$

Густина струму в стрижні ротора, А/мм<sup>2</sup>

$$J_{rc} = \frac{I_{r1}}{S_{rc}}.$$

Струм в коротко замикальному кільці, А

$$I_{r2} = \frac{I_{r1}}{K_{fhr}}.$$

Електричні втрати в обмотці статора, Вт

$$P_{els} = m_s \cdot I_{sN}^2 \cdot R_s'.$$

Електричні втрати в обмотці ротора, Вт

$$P_{elr} = m_s \cdot (I_r'')^2 \cdot R_r''.$$

Сумарні втрати потужності в двигуні, Вт

$$\Delta P = P_{els} + P_{elr} + P_{mags} + P_{mec} + P_{ad}.$$

Потужність (електрична), що підводиться до двигуна, Вт ( $P_N$ , кВт)

$$P_{in} = P_N \cdot 10^3 + \Delta P.$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta_N = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}}.$$

Уточнене значення номінальної корисної потужності двигуна, Вт

$$P_N = m_s \cdot U_{sN} \cdot I_{sN} \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_N.$$

Ця потужність повинна дорівнювати вихідний номінальній потужності, яка задана в технічному завданні.

### *Розрахунок робочих характеристик*

За робочі характеристики маємо залежності фазного струму статора  $I_s$ , ККД  $\eta$ , коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ , вхідної потужності  $P_{in}$ , ковзання  $s$  і частоти обертання ротора  $n$  від корисної (вихідної) потужності  $P$ .

Щоб отримати ці характеристики, слід задавати різні значення потужності  $P$ , які вказані в таблиці 4.7 у відносній формі.

$$P_* = \frac{P}{P_N},$$

Проводити розрахунки за методикою, яка використовується для визначення параметрів номінального режиму роботи при цьому замість номінальних значень потужності  $P_N$ , фазного струму обмотки статора  $I_{sN}$ , ККД  $\eta$ , коефіцієнта потужності  $\cos_N$ , ковзання  $s_N$ , частоти обертання  $n_N$  тощо треба оперувати з їхніми поточними значеннями, виключаючи індекс  $_N$ , тобто  $P$ ,  $I_s$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$ ,  $s$ ,  $n$  тощо. У перший стовпчик при  $P=0$  вносяться дані режиму неробочого ходу.

Зауважимо, що при розрахунках додаткових втрат потужності для часткових значень потужності  $P$  умовно приймаються значення ККД  $\eta$ , які дорівнюють ККД  $\eta_N$  при номінальному значенні потужності  $P_N$ .

Якщо проводиться розрахунок характеристик двигуна при номінальних значеннях фазної напруги і частоти живлення, то, природно, треба брати відповідні значення напруги  $U_s$  і частоти  $f_s$ . Тоді зміни відбуваються для всіх величин, пов'язаних не тільки  $P$ ,  $I_s$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$ ,  $s$ ,  $n$ , але і з  $U_s$  і  $f_s$  у всіх попередніх розділах. Конструктивні параметри двигуна і вже встановлені розміри елементів його конструкції залишаються незмінними.

Результати основних етапів розрахунку механічних характеристик викладені в таблиці 4.7. За цими результатами необхідно в загальній координатній системі побудувати залежності  $I_s(P)$ ,  $\eta(P)$ ,  $\cos \varphi(P)$ ,  $P_{in}(P)$ ,  $s(P)$ ,  $n(P)$ . Для кожної з цих величин повинні бути вказані конкретні масштаби на відповідних координатних осях. При мінімізації кількості характеристик можна виключити залежності  $P_{in}(P)$  і  $s(P)$ , які, в принципі, є похідними залежностей  $\eta(P)$  і  $n(P)$ .

Таблиця 4.7 – Розрахункові дані для побудови робочих характеристик асинхронного двигуна

Параметри	Корисна потужність $P_*$ , в.о.						
	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$P$ , кВт							
$P_{mec}$ , Вт							
$P_{mags}$ , Вт							
$P_{ad}$ , Вт							
$R_l$ , Ом							
$Z_l$ , Ом							
$s$ , в.о.							
$n$ , об/хв							
$I_r''$ , А							
$I_{sa}$ , А							
$I_{sl}$ , А							
$I_s$ , А							
$\cos\varphi$							
$P_{els}$ , Вт							
$P_{elr}$ , Вт							
$\Delta P$ , Вт							
$P_{in}$ , Вт							
$\eta$							

#### *Розрахунок максимального обертового моменту*

Для розрахунку максимального моменту використовується перетворена схема заміщення асинхронного двигуна (рис. 4.5), у якій для опору  $R_l$  треба взяти значення  $R_{M \max}$ , яке відповідає роботі двигуна в режимі максимального моменту. Індуктивні опори визначаються з урахуванням насичення, яке відповідає навантаженню двигуна при максимальному моменті.

Розрахунок максимального моменту проводиться за умови використання напівзакритих трапецеїдальних пазів статора і овальних напівзакритих пазів ротора.

Змінна частина коефіцієнта провідності пазового розсіяння статора

$$\lambda_{snv} = \left[ \frac{3 \cdot h_{s2}}{(b_{s2} + b_{s1})} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}} \right] \cdot K'_{\beta s},$$

де  $K'_{\beta s}$  – коефіцієнт, що враховує укорочення кроку обмотки статора ( $K'_{\beta s} \approx 1$ ).

Складова коефіцієнта провідності розсіювання обмотки статора, залежна від насичення

$$\lambda_{sv} = \lambda_{snv} + \lambda_{sd},$$

де  $\lambda_{sd}$  – коефіцієнт провідності диференціального розсіювання (п. 5.2.5.2)

Змінна частина коефіцієнта пазового розсіювання обмотки ротора у випадку напівзакритого паза овальної форми (рис. 4.1)

$$\lambda_{rv} = \frac{h_{r1}}{b_{r1}}.$$

Складова коефіцієнта провідності розсіювання обмотки ротора, залежна від насичення

$$\lambda_{rv} = \lambda_{rnv} + \lambda_{rd},$$

де  $\lambda_{rd}$  – коефіцієнт провідності диференціального розсіювання ротора (п.5.2.6.3).

Індуктивний опір розсіювання двигуна, залежний від насичення, Ом

$$X_{\sigma v} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_{\sigma r} \cdot \frac{\lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma r}},$$

де  $\lambda_{\sigma s}$   $\lambda_{\sigma r}$  – коефіцієнт провідності розсіювання статора і ротора, обчислені без урахування насичення (п. 5.2.5.4 і п. 5.2.6.6).

Індуктивний опір розсіювання двигуна, незалежний від насичення, Ом

$$X_{\sigma c} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{\sigma s} - \lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_{\sigma r} \cdot \frac{\lambda_{\sigma r} - \lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma r}}.$$

Струм ротора при максимальному моменті, А

$$I_{rM \max}'' = \frac{U_s}{\sqrt{2 \cdot [(R'_s)^2 + (X_{\sigma c} + 0,0825 \cdot X_{\sigma v})^2 + R'_s \cdot (X_{\sigma c} + 0,0825 \cdot X_{\sigma v})]}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_s \cdot [R'_s + 2 \cdot (X_{\sigma c} + 0,0825 \cdot X_{\sigma v})] \cdot X_{\sigma v}}{2 \cdot z_{Qs} \cdot [(R'_s)^2 + (X_{\sigma c} + 0,0825 \cdot X_{\sigma v})^2 + R'_s \cdot (X_{\sigma c} + 0,0825 \cdot X_{\sigma v})]},$$

де всі величини визначені з попередніх розділах розрахунку двигуна.

Повний опір схеми заміщення при максимальному моменті, Ом

$$Z_{M \max} = \frac{U_s}{I_{rM \max}''}.$$

Повний опір схеми заміщення при нескінченно великому ковзанні, Ом

$$Z_{s\infty} = 0,5 \left( \sqrt{(R_s')^2 + 2 \cdot Z_{M \max}^2} - R_s' \right).$$

Еквівалентний опір схеми заміщення при максимальному моменті, Ом

$$R_{M \max} = Z_{s\infty} + R_s'.$$

Кратність максимального моменту

$$k_{Mm} = \frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{m_s \cdot U_s^2 \cdot (1 - s_N)}{2 \cdot R_{M \max} \cdot P \cdot 10^3},$$

де  $M_N$  – номінальний обертальний момент двигуна, Н·м ( $P_N$ , кВт;  $n_N$ , об/хв.)

$$M_N = 9,55 \cdot \frac{P_N \cdot 10^3}{n_N}.$$

Кратність максимального моменту асинхронного двигуна повинна бути не менш передбаченого ГОСТ 19523, але все ж таки звичайно  $k_{Mm} > 3$ .

Максимальний момент, Н·м

$$M_{\max} = k_{Mm} \cdot M_N.$$

Критичне ковзання при максимальному моменті

$$s_{cr} = \frac{R_r''}{Z_{s\infty}}.$$

*Розрахунок початкових пускових струму і обертального моменту*

При визначенні пускових струму і обертального моменту враховується явище витіснення струму в пазах короткозамкненої обмотки ротора і насичення зубців статора і ротора на шляхах потоків розсіяння в них.



Активні і індуктивні опори двигуна в режимі пуску

Висота стрижня клітки ротора, мм

$$h_{rc} = h_r - h_{r1}.$$

Зведена висота стрижня ротора для литої алюмінієвої клітки

$$h'_{rc} = 0,0735 \cdot h_{rc} \cdot \sqrt{\frac{1}{k_{\theta Al}}}.$$

Розрахункова глибина проникнення струму в стрижні, мм

$$h_{rc\delta} = \frac{h_{rc}}{1 + k_{Ra}},$$

де  $k_{Ra}$  – коефіцієнт активного опору, визначається за рис. 5.6 залежно від  $h'_{rc}$ .

Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму, мм

$$b_{rc\delta} = 2 \cdot r_{r1} - \frac{2 \cdot (r_{r1} - r_{r2})}{h_{r2}} \cdot (h_{rc\delta} - r_{r1}),$$

де геометричні розміри паза ротора беруться за рисунком 4.6.

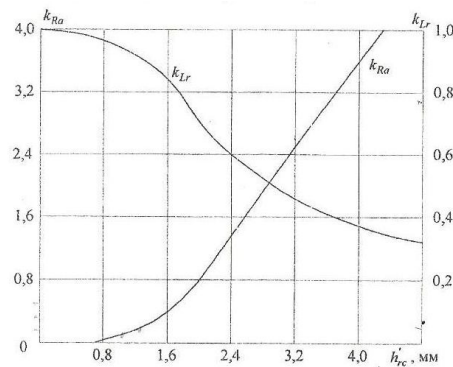


Рисунок 4.6 – Коефіцієнти опорів стрижня ротора

Площа поперечного перерізу стрижня при розрахунковій глибині проникнення, мм<sup>2</sup>

$$S_{rc\delta} = \frac{\pi}{2} \cdot r_{r1}^2 + \left( r_{r1}^2 + \frac{b_{rc\delta}}{2} \right) \cdot (h_{rc\delta} - r_{r1}).$$

Коефіцієнт витіснення струму

$$k_{c\delta} = \frac{S_{rc}}{S_{rc\delta}},$$

де  $S_{rc}$  – площа поперечного перерізу стрижня ротора без урахування витіснення струму (п. 4.12).

Активний опір стрижня при 20°C для пускового режиму, Ом

$$R_{r\theta a1f} = R_{r\theta a1} \cdot k_{c\delta}.$$

Активний опір обмотки ротора при 20°C, зведений до обмотки статора, для пускового режиму, Ом

$$R'_{r\theta af} = K_{sr} \cdot (R_{r\theta a1f} + R_{r\theta a2}),$$

де  $K_{sr}$  – коефіцієнт провідності розсіяння паза ротора пуску для овального напівзакритого паза (рис. 4.1)

$$\lambda_{rnf} = \frac{h_{r1}}{b_{r1}} + \left[ \frac{h_{r2} + 0,8 \cdot r_{r2}}{6 \cdot r_{r1}} \left( 1 - \frac{\pi \cdot r_{r1}^2}{2 \cdot S_{rc}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{r1}}{4r_{r1}} \right] \cdot k_{Lr},$$

де  $K_{sr}$  – коефіцієнт індуктивного опору, визначається за рисунком 5.6 залежно від  $h'_{rc}$ .

#### 5.7.1.10 Коефіцієнт провідності розсіяння обмотки ротора при пуску

$$\lambda_{\sigma rf} = \lambda_{rnf} + \lambda_{rd} + \lambda_{rfh} + \lambda_{rsq},$$

де  $\lambda_{rd}$ ,  $\lambda_{rfh}$ ,  $\lambda_{rsq}$  такі самі.

Індуктивний опір розсіяння двигуна при пуску, залежний і не залежний від насичення, Ом:

$$X_{\sigma rf} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_{\sigma r} \cdot \frac{\lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma f}};$$

$$X_{\sigma cf} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{\sigma s} - \lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_{\sigma r} \cdot \frac{\lambda_{\sigma f} - \lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma f}}.$$

Коефіцієнт провідності розсіяння  $\lambda_{sv}$  і  $\lambda_{rsv}$ , що входять в ці вирази, визначені в розділі розрахунку максимального моменту, величини  $\lambda_{os}$ ,  $X'_{os}$  і  $X'_{or}$ .

Активний опір двигуна при пуску, Ом

$$R_{kf} = R'_s + R'_{raf} \cdot k_{\theta Al} \cdot (1 + k_{os})^2 \cdot (1 + C_s^2),$$

де  $k_{os}$  – коефіцієнт розсіяння обмотки статора.

Початкові пускові струм і момент двигуна

Струм ротора при пуску, А

$$I''_{rf} = \frac{U_s}{\sqrt{R_{kf}^2 + (X_{\sigma f} + 0,0825 \cdot X_{\sigma f})^2}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot a_s \cdot \delta \cdot X_{\sigma f} \cdot (X_{\sigma f} + 0,0825 \cdot X_{\sigma f})}{z_{Qs} \cdot [R_{kf}^2 + (X_{\sigma f} + 0,0825 \cdot X_{\sigma f})^2]}.$$

Повний опір схеми заміщення при пуску, Ом

$$Z_{kf} = \frac{U_s}{I''_{rf}},$$

Індуктивний опір схеми заміщення при пуску, Ом

$$X_{kf} = \sqrt{Z_{kf}^2 - R_{kf}^2}.$$

Активна складова струму статора при пуску, А

$$I_{saf} = I_{sas} + I''_{rf} \cdot \left( \frac{R_{kf}}{Z_{kf}} + \frac{X_{kf}}{Z_{kf}} \cdot 2 \cdot C_s \right).$$

Реактивна складова струму статора при пуску, А

$$I_{s\mu f} = I_{s\mu s} + I''_{rf} \cdot \left( \frac{X_{kf}}{Z_{kf}} - \frac{R_{kf}}{Z_{kf}} \cdot 2 \cdot C_s \right).$$

Фазний струм статора при пуску, А

$$I_{sf} = \sqrt{I_{saf}^2 + I_{s\mu f}^2}.$$

Кратність початкового пускового струму

$$k_{I1} = \frac{I_{sf}}{I_s}.$$

Активний опір ротора при пуску, зведений до статора, при розрахунковій робочій температурі, Ом

$$R_{rf}'' = R_{r\theta af}' \cdot k_{\theta Al} \cdot (1 + k_{cs})^2 \cdot (1 + C_s^2).$$

Кратність початкового пускового обертового моменту ( $P$ , кВт).

$$k_{M1} = \frac{M_1}{M_N} = m_s \cdot (I_{rf}'')^2 \cdot \frac{R_{rf}'' \cdot (1 - s_N)}{P \cdot 10^3}.$$

Початковий пусковий момент

$$M_1 = k_{M1} \cdot M_N.$$

Розрахункові значення кратності пускового струму і пускового моменту повинні відповідати вимогам ГОСТ 19523. Для асинхронних двигунів серії 4А при  $h \leq 132$  мм  $k_{M1} \approx 1,6 - 2,2$ ,  $k_{I1} \approx 4,0 - 7,5$  залежно від кількості полюсів; при  $h = 160 - 250$  мм,  $k_{M1} \approx 1,2 - 1,4$ ,  $k_{I1} \approx 5,0 - 7,5$ .

### **Питання для самостійного вивчення**

1. За рахунком чого зубці насичуються більшою мірою?
2. Які показники характеризують електротехнічну сталь?
3. Які показники впливають на ККД?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко; под ред. О. Д. Гольдберга; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 430 с.
2. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
3. Міліх В. І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутою обмоткою ротора: навч. посібник [для студ. електротехн. спеціальностей] / В. І. Міліх. – Харків : НТУ «ХП», 2009. – 96 с.
4. Міліх В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В. І. Міліх, О. О. Шавьолкін; За ред. В. І. Міліх. – Київ : «Каравела», 2007. – 688 с.
5. Милых В. И. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка / В. И. Милых, Н. В. Полякова. – 2006. – № 2. – С. 40–46.

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до практичних занять та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН»**

*(для студентів 5 курсу денної та 5–6 курсу заочної форм навчання  
спеціальності*

*141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів)*

Укладач **ПЕТРЕНКО** Олександр Миколайович

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 179М

---

Підп. до друку 22.11.2016      Формат 60×84/16

Друк на ризографі.      Ум. друк. арк. 1,2

Тираж 50 пр.      Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.