

М. П. Розводюк, В. С. Бомбик, О. А. Жуков

**Розрахунок і конструювання
трифазних асинхронних двигунів з
короткозамкненим ротором.
Курсове проєктування**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. П. Розводюк, В. С. Бомбик, О. А. Жуков

**Розрахунок і конструювання
трифазних асинхронних двигунів з
короткозамкненим ротором.
Курсове проєктування**

Електронний навчальний посібник
комбінованого (локального та мережного) використання

Вінниця
ВНТУ
2024

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 30.05.2024 р.)

Рецензенти:

В. О. Комар, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

С. М. Бойко, кандидат технічних наук, доцент

Д. Х. Штофель, кандидат технічних наук, доцент

Розводюк, М. П.

Р64 Розрахунок і конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Курсове проєктування : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Розводюк М. П., Бомбик В. С., Жуков О. А. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 138 с.

В навчальному посібнику викладено послідовність розрахунку й конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Приведено вихідні дані та завдання для курсового проєктування, а також приклад розрахунку в математичному пакеті прикладних програм MathCAD. Навчальний посібник рекомендовано для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

УДК 621.313(075)

Зміст

ВСТУП.....	5
ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТУВАННЯ.....	6
1 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА	9
2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК	20
2.1 Обмотка статора	20
2.2 Обмотка короткозамкненого ротора	29
3 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА.....	34
3.1 Загальні положення	34
3.2 Розрахунок МРС ділянок магнітного кола.....	35
3.2.1 МРС повітряного зазору	35
3.2.2 МРС зубців статора.....	36
3.2.3 МРС зубців ротора	38
3.2.4 МРС спинки статора	38
3.2.5 МРС спинки ротора	40
3.2.6 Параметри магнітного кола	41
4 АКТИВНІ ТА ІНДУКТИВНІ ОПОРИ ОБМОТОК	43
4.1 Загальні положення	43
4.2 Опір обмотки статора	43
4.3 Опір обмотки ротора	46
4.4 Параметри Г-подібної схеми заміщення	50
5 РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДУ І НОМІНАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	533
5.1 Режим холостого ходу.....	53
5.2 Режим номінального навантаження	55
5.3 Розрахунок робочих характеристик	59
6 РОЗРАХУНОК ПУСКОВОГО СТРУМУ, ПУСКОВОГО І МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТІВ	60
6.1 Параметри обмоток ротора з врахуванням струму витіснення	60
6.2 Параметри обмоток з урахуванням витіснення струму і насичення сталі зубців.....	62
6.3 Пусковий струм і пусковий момент	66
6.4 Максимальний момент	67
7 ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ	69
7.1 Тепловий розрахунок	69

7.2 Вентиляційний розрахунок	75
7.2.1 Двигуни зі ступенем захисту IP23 і способом охолодження IC01	75
7.2.2 Двигуни зі ступенем захисту IP44 і способом охолодження IC0141	76
8 МАСА ДВИГУНА ТА ДИНАМІЧНИЙ МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ	77
9 КОНСТРУКЦІЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	79
10 КУРСОВЕ ПРОЄКТУВАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»	86
10.1 Загальні вимоги до курсового проєкту.....	86
10.2 Вимоги до оформлення курсового проєкту	86
10.3 Зміст і структура пояснювальної записки	88
10.4 Вміст вступної частини пояснювальної записки	90
10.4.1 Титульний аркуш	90
10.4.2 Індивідуальне завдання.....	90
10.4.3 Анотація.....	91
10.4.4 Зміст.....	91
10.4.5 Технічне завдання	92
10.5 Вміст і оформлення основної частини	92
10.5.1 Вступ.....	92
10.5.2 Опис основної частини курсового проєкту	93
10.5.3 Висновки.....	93
10.5.4 Оформлення переліку використаних джерел	93
10.5.5 Оформлення додатків	94
10.5.6 Графічна частина.....	95
10.6 Порядок виконання і захисту курсового проєкту.....	95
10.7 Критерії оцінювання курсового проєкту.....	96
Перелік використаних джерел.....	99
Додаток А Завдання на проєктування.....	100
Додаток Б Вихідні дані для проєктування.....	102
Додаток В Каталожні дані асинхронних двигунів серії 4А	104
Додаток Г Приклад оформлення титульного аркуша	106
Додаток Д Приклад оформлення технічного завдання	107
Додаток Е Приклад розрахунків.....	110

ВСТУП

Навчальний посібник призначений для курсового проєктування з дисципліни «Електричні машини», зокрема для закріплення теоретичних знань з розділу «Асинхронні машини».

Асинхронні електродвигуни є найбільш популярними в електроприводі завдяки їхній доступності, надійності та низькій експлуатаційній складності, що забезпечує тривалий термін служби за умови дотримання відповідних стандартів.

Тому в рамках курсового проєкту пропонується більш детально дослідити основні етапи проєктування трифазного асинхронного двигуна: визначення основних розмірів, розрахунок обмоток статора і короткозамкненого ротора, магнітного кола, параметрів еквівалентної схеми, режимів роботи за холостого ходу і під навантаженням, пускового струму, пускового і максимального моментів, тепловий і вентиляційний розрахунок, розрахунок маси і моменту інерції, а також вибір основних габаритних розмірів.

Кожному студенту запропоновано здійснити розрахунок і конструювання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором згідно з індивідуальним завданням (додаток А) та заданим варіантом (додаток Б) з використанням наведеної в посібнику методики. Каталогні дані серійних двигунів для порівняння наведено в додатку В, взято з [1].

Для полегшення розрахунків в додатку Е наведено приклад розрахунку в математичному пакеті прикладних програм (ППП) MathCAD.

За результатами виконаного курсового проєкту передбачається його захист. Для успішного захисту пропонується переглянути теоретичні відомості з цих розділів електричних машин, наприклад, у матеріалах [3] – [7].

Навчальний посібник побудовано на матеріалах робіт [8] – [11].

ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТУВАННЯ

Вихідні дані для проєктування:

- 1) номінальний режим роботи – тривалий (S1);
- 2) виконання ротора – короткозамкнений;
- 3) номінальна корисна потужність P_2 , кВт;
- 4) кількість фаз обмотки статора $m_1 = 3$;
- 5) схема з'єднань фазних обмоток статора – Δ/Y ;
- 6) номінальна лінійна напруга $U_{1л}$, В;
- 7) частота мережі $f_1 = 50$ Гц;
- 8) синхронна частота обертання n_1 , об/хв;
- 9) ступінь захисту від зовнішніх впливів – IP44 або IP23;
- 10) спосіб охолодження – IC0141 або IC01;
- 11) кліматичні умови і категорія розміщення – У3;
- 12) виконання за способом монтажу – IM1001;
- 13) форма кінця вала, що виступає, – циліндрична.

Вихідні дані для проєктування наведено в додатку Б.

Ступені захисту:

IP44 – закрита машина, захищена від потрапляння твердих тіл розміром більше 1 мм і від водних бризок;

IP23 – захищена машина, захищена від потрапляння твердих тіл розміром більше 12 мм і від дощу.

Способи охолодження:

IC0141 – закрита машина, що обдувається зовнішнім вентилятором, розміщеним на валу машини;

IC01 – закрита машина з самовентиляцією (вентилятор розміщено на валу машини).

Кліматичні умови:

У – помірний клімат;

ХЛ – холодний клімат.

Категорія розміщення:

3 – машина, призначена для роботи в закритих приміщеннях з природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов;

4 – машина, призначена для роботи в закритих опалювальних і вентильованих виробничих або інших приміщеннях.

Виконання за способом монтажу:

IM1001 – машина з двома підшипниковими щитами на лапах, з одним горизонтально направленим циліндричним кінцем вала;

IM1011 – те саме, з вертикально направленим вниз одним циліндричним кінцем вала;

IM3011 – машина з двома підшипниковими щитами без лап, з фланцем на одному підшипниковому щиті, з вертикально направленим вниз одним циліндричним кінцем вала.

Кількість пар полюсів асинхронного двигуна можна визначити, шт.:

$$p = \frac{60 f_1}{n_1}.$$

Номінальна фазна напруга U_1 за з'єднання обмоток статора:

➤ у «зірку» Y:

$$U_1 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}};$$

➤ у «трикутник» Δ:

$$U_1 = U_{1л}.$$

Двигуни з короткозамкненим ротором виконують з висотою осі обертання $h = 50...355$ мм. Причому для осі обертання:

- $h = 50...355$ мм – виконують двигуни закритого виконання (IP44) із зовнішнім обдуванням вентилятором, розміщеним на валу двигуна (IC0141),

- $h = 160...355$ мм – виконують двигуни захищеного виконання (IP23) із самовентиляцією (IC01).

Двигуни з $h = 50...132$ мм виконують з ізоляцією обмоток статора класу **B**, а інші – з ізоляцією класу **F**.

Обмотка ротора має клас ізоляції **B**

В двигунах з висотою осі обертання:

- $h \leq 160$ мм – застосовується одношарова всіпна концентрична обмотка статора з круглих проводів з трапецеїдальними напівзакритими пазами;

- $h \geq 180$ мм – застосовується двошарова всіпна обмотка з такими самими пазами;

- $h > 250$ мм – обмотка статора є двошаровою, виготовляється з формованих півкотушок з проводу прямокутної форми, які вкладаються в прямокутні напіввідкриті пази.

Високовольтні електродвигуни виконують з відкритими пазами.

В короткозамкненому роторі за умови $h \leq 250$ мм використовують пази овальної форми, причому:

- за $h \leq 132$ мм – виконують напівзакритими;

- за $h \geq 160$ мм – закритими.

Ротори двигунів за умови $h \leq 160$ мм мають скіс пазів. Двигуни з більшими висотами осі обертання виконують без скосу пазів.

Станину асинхронного двигуна переважно виконують чавунною литою. В малих двигунах за умови $h \leq 71$ мм поряд з чавунними застосовують станини з алюмінієвих сплавів. В двигунах з $h \geq 280$ мм крім чавунних використовують і зварні станини з сталевого прокату.

Станини двигунів із захистом IP23 виконують з внутрішніми повздовжніми ребрами. Станини за радіальної системи вентиляції мають в бокових частинах вентиляційні отвори для виходу охолоджувального повітря. За аксіальної схеми вентиляції отвори в станині відсутні.

Станини двигунів із ступенем захисту IP44 зазвичай мають повздовжні ребра на зовнішній поверхні.

1 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА

За заданих значень висоти осі обертання вала h потрібно спроектувати двигун з максимально допустимим діаметром корпусу $D_{\text{корп}}$, щоб забезпечити мінімально допустиму відстань h_1 від нижньої частини корпусу до опорної площини лап (рисунок 1.1).

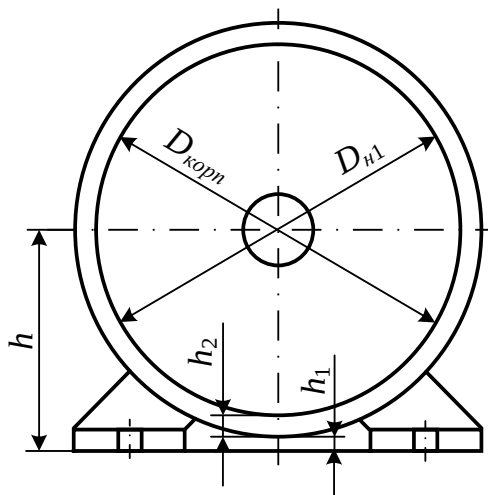


Рисунок 1.1 – До визначення розмірів асинхронного двигуна

В завданні на проектування задано:

- h_2 – значення товщини стінок корпусу;
- $D_{\text{н1max}}$ – максимально допустимий зовнішній діаметр магнітопроводу статора.

Головні розміри асинхронного двигуна:

- D_1 – внутрішній діаметр, мм;
- l_1 – довжина магнітопроводу статора, мм.

Вони визначають всі інші розміри та від них залежать габарити, маса та інші показники електричної машини.

Спочатку вибирається зовнішній діаметр магнітопроводу статора $D_{\text{н1}}$ таким, що дорівнює його максимально допустимому значенню $D_{\text{н1max}}$, тобто $D_{\text{н1}} = D_{\text{н1max}}$.

Внутрішній діаметр D_1 визначається за допомогою залежності $D_1 = f(D_{\text{н1}})$, наведеної в таблиці 1.1.

Розрахункова потужність асинхронного двигуна, ВА:

$$S'_1 = m_1 E_1 I_1, \quad (1.1)$$

де E_1 – ЕРС фази статора, В;
 I_1 – струм фази статора, А.

Таблиця 1.1 – Залежність $D_1 = f(D_{H1})$

$2p$	D_{H1} , мм	D_1 , мм
2	80...360	$D_1 = 0,61 \cdot D_{H1} - 4$
	361...750	$D_1 = 0,485 \cdot D_{H1} + 28$
4	80...520	$D_1 = 0,68 \cdot D_{H1} - 5$
6; 8	80...590	$D_1 = 0,72 \cdot D_{H1} - 3$
8	80...590	$D_1 = 0,72 \cdot D_{H1} - 3$

Оскільки магнітне поле асинхронної машини є синусоїдальним, то

$$S'_1 = \frac{D_1^2 l'_1 n_1 A_1 B_\delta k_{o\delta 1}}{8,62 \cdot 10^7}, \quad (1.2)$$

де l'_1 – розрахункова довжина магнітопроводу статора, мм;

A_1 – лінійне навантаження статора, А/см;

B_δ – максимальне значення магнітної індукції в повітряному зазорі, Тл;

$k_{o\delta 1}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора.

Залежність (1.2) може бути подана у вигляді:

$$S'_1 = \frac{D_1^2 l'_1 n_1}{C_A}, \quad (1.3)$$

де C_A – машинна стала Арнольда, мм³·(об/хв)/(ВА):

$$C_A = \frac{8,62 \cdot 10^7}{A_1 B_\delta k_{o\delta 1}}. \quad (1.4)$$

Коефіцієнт використання машини, ВА/(мм³·об/хв):

$$k_A = \frac{1}{C_A}. \quad (1.5)$$

Розрахункова потужність може бути виражена через корисну потужність P_2 :

$$S'_1 = \frac{k_n \cdot P_2 \cdot 10^3}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (1.6)$$

де k_n – коефіцієнт навантаження, в.о.:

$$k_n = \frac{E_1}{U_1}, \quad (1.7)$$

де η – коефіцієнт корисної дії, в.о.;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, в.о.

Значення k_n вибираються з рис. 1.2.

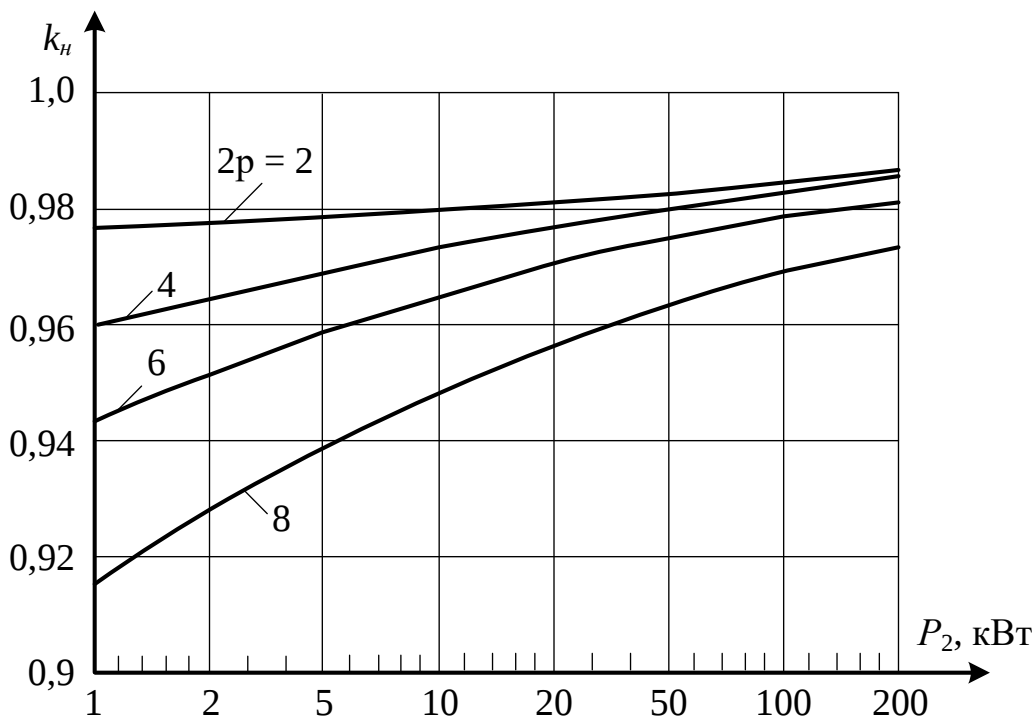


Рисунок 1.2 – Вибір коефіцієнта навантаження k_n

Значення η вибирається з рис. 1.3.

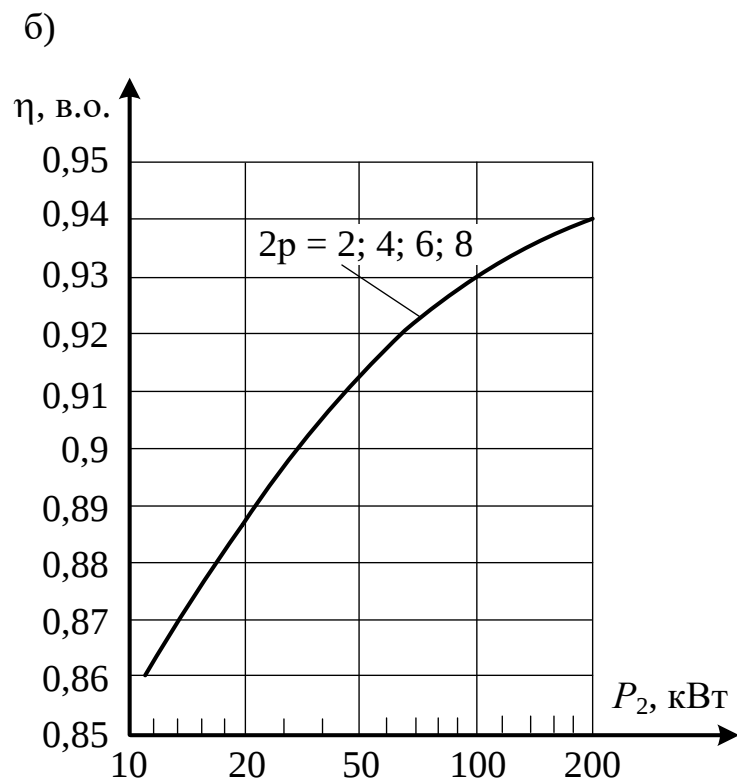
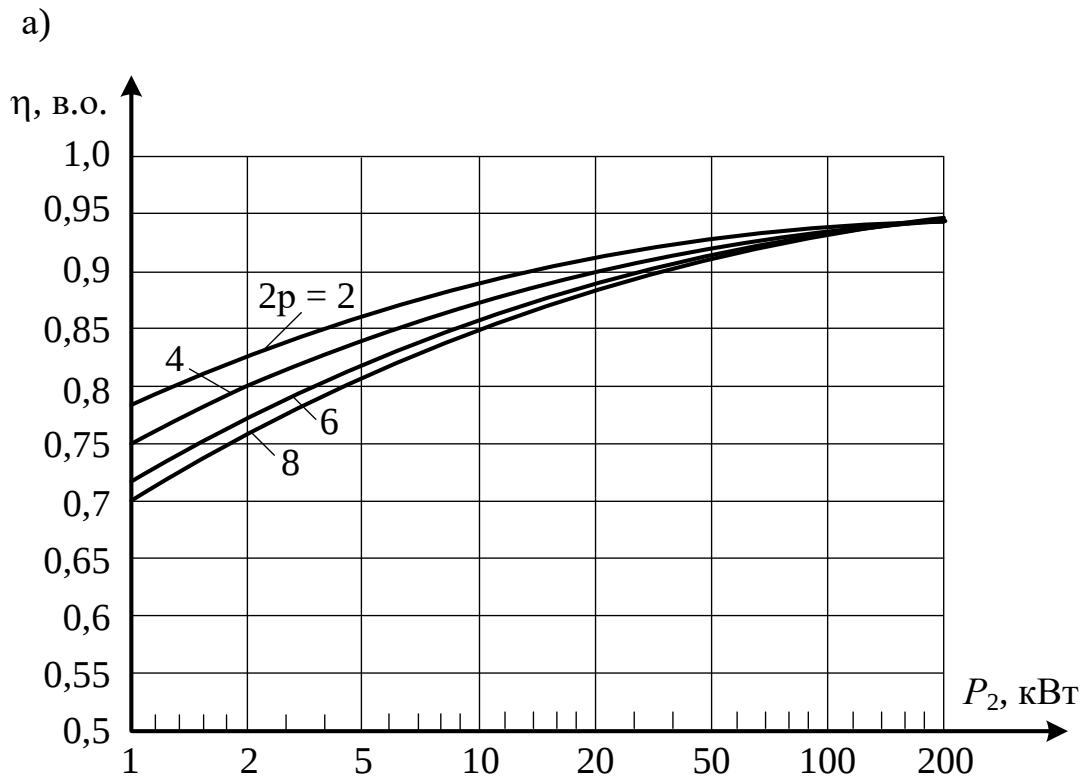


Рисунок 1.3 – Вибір ККД η :

- а) виконання із захистом IP44, спосіб охолодження IC0141;
- б) виконання із захистом IP23, спосіб охолодження IC01

Значення $\cos\varphi$ вибирається з рис. 1.4.

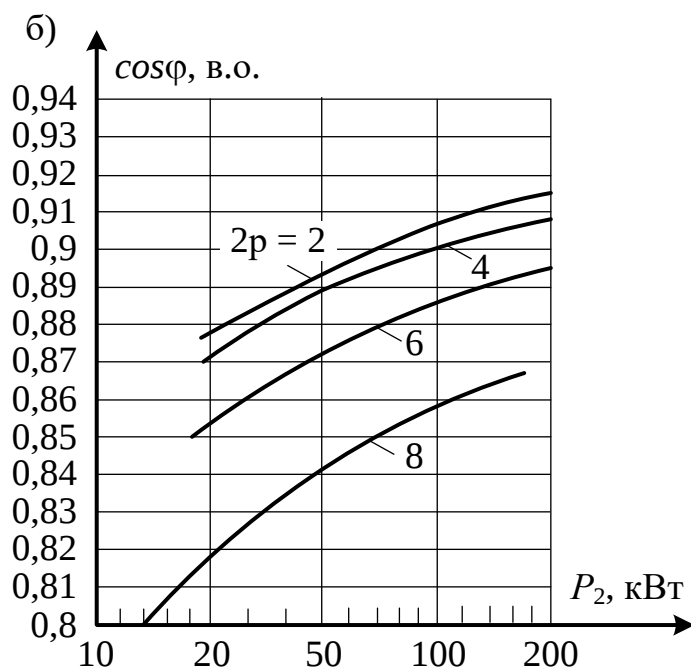
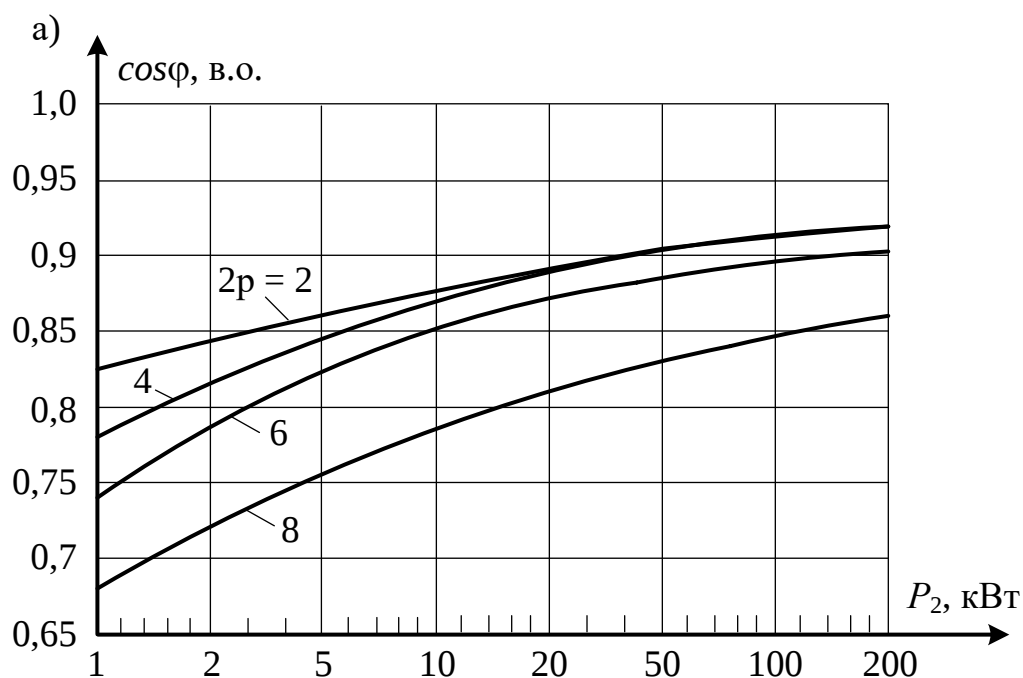


Рисунок 1.4 – Вибір коефіцієнт потужності $\cos\varphi$:

а) виконання за захистом IP44, спосіб охолодження IC0141;

б) виконання за захистом IP23, спосіб охолодження IC01

Значення обмотувального коефіцієнта $k_{об1}$ вибирається:

- $k_{об1} = 0,91 \dots 0,94$ за умови $2p \geq 4$;
- $k_{об1} = 0,79$ за умови $2p = 2$.

Причому більші значення вибираються для двигунів меншої потужності.

Залежно від типу обмотки та пазів вибирається значення лінійного навантаження A_1 (рис. 1.5) та індукція в повітряному зазорі B_δ (рис. 1.6).

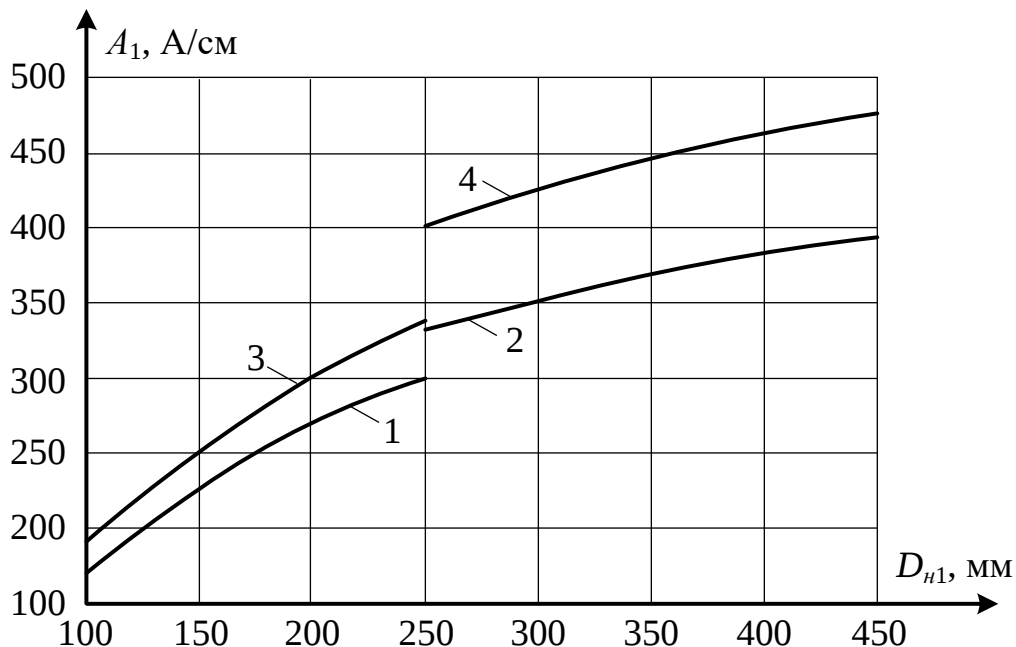


Рисунок 1.5 – Вибір лінійного навантаження A_1

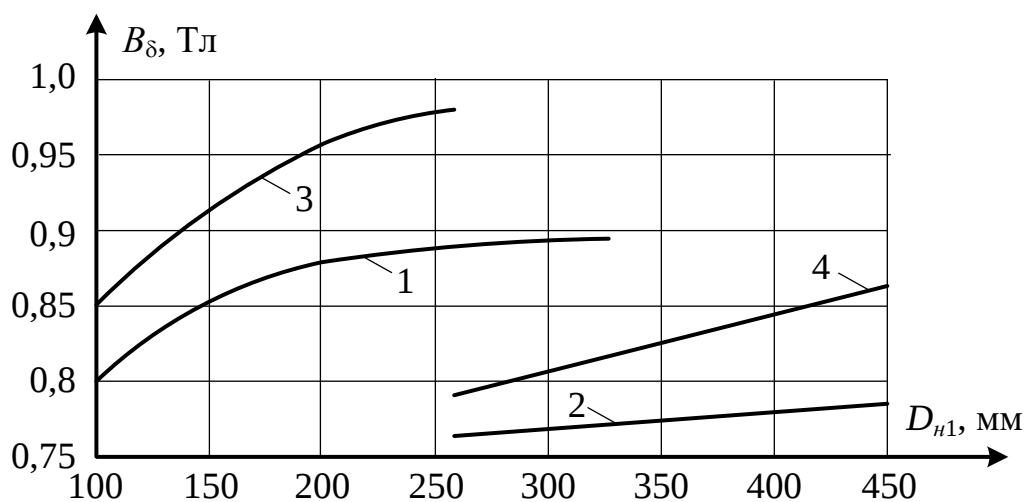


Рисунок 1.6 – Вибір індукції в повітряному зазорі B_δ

На рис. 1.5 та рис. 1.6:

1 – виконання із захистом IP44, спосіб охолодження IC0141, напівзакриті пази, одношарова обмотка;

2 – те саме, що і 1, але двошарова обмотка;

3 – виконання із захистом IP23, спосіб охолодження IC01, напівзакриті пази, одношарова обмотка;

4 – те саме, що і 3, але двошарова обмотка.

На рис. 1.5 та рис. 1.6 наведено середні значення A_1 та B_δ для двигунів за умови $2p = 4$ і класу ізоляції F.

У випадку іншого числа полюсів:

- знайдене з рис. 1.5 A_1 потрібно помножити на поправковий коефіцієнт k_1 ;

- знайдене з рис. 1.6 B_δ потрібно помножити на поправковий коефіцієнт k_2 .

Ці коефіцієнти наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Значення поправкових коефіцієнтів k_1 та k_2

Ступінь захисту, спосіб охолодження	$D_{н1}$, мм	Коефіцієнт	$2p$		
			2	6	8
IP44 IC00141	80...250	k_1	0,93	1	1
		k_2	1	1	1,2
	250...500	k_1	1,1	0,93	0,93
	250...700	k_2	0,96	1,04	1,04
IP23 IC01	250...500	k_1	1,16	0,9	0,84
	250...700	k_2	0,98	1,02	1,02

Примітка. У випадку виконання двигуна з ізоляцією класу В (за $h = 50...132$ мм), значення A_1 ще додатково домножається на коефіцієнт $k_3 = 0,86$.

Всі знайдені значення коефіцієнтів, енергетичних параметрів і електромагнітних навантажень є попередніми і потребують подальшого уточнення.

Розрахункова довжина магнітопроводу статора, мм:

$$l'_1 = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot S'_1}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot k_{o\delta 1}}. \quad (1.8)$$

За відсутності в магнітопроводі радіальних вентиляційних каналів отримане значення l'_1 потрібно округлити до l_1 :

- за $l'_1 \leq 100$ мм – до найближчого цілого числа;
- за $l'_1 > 100$ мм – до найближчого цілого числа, кратного п'яти.

У разі довжини магнітопроводу більше $l'_1 > 300 \dots 350$ мм застосовуються радіальні вентиляційні канали. В цьому випадку l_1 визначається за формулою:

$$l_1 = l'_1 + n_{k1} l_{k1}, \quad (1.9)$$

де n_{k1} – число каналів;

l_{k1} – ширина каналів.

Розраховане за (1.9) значення l_1 округлюють до найближчого числа, кратного п'яти.

Кількість каналів n_{k1} визначається довжиною одного пакета магнітопроводу статора l_{n1} , яка вибирається з діапазону $l_{n1} = 55 \dots 75$ мм за ширини каналу $l_{k1} = 10$ мм.

Кількість каналів:

$$n_{k1} = n_{n1} - 1, \quad (1.10)$$

де n_{n1} – число пакетів:

$$n_{n1} \approx \frac{l'_1}{l_{n1}}, \quad (1.11)$$

яке заокруглюється до цілого числа.

Під час вибору ширини (довжини) одного пакета l_{k1} має виконуватися умова:

$$l_{n1} \cdot n_{n1} + l_{k1} (n_{n1} - 1) = l_1. \quad (1.12)$$

Після знаходження l_1 потрібно знайти відношення

$$\lambda = \frac{l_1}{D_1}, \quad (1.13)$$

значення якого має наближатися до гранично допустимого $\lambda_{\max}$, яке визначається для двигунів з $2p = 4$ за формулами, наведеними в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Визначення $\lambda_{\max}$

Ступінь захисту, спосіб охолодження	$D_{н1}$, мм	$\lambda_{\max}$
IP44, IC0141	80...700	$1,46 - 0,00071D_{н1}$
IP23, IC01	250...700	$1,33 - 0,00087D_{н1}$

Примітка. За іншої кількості полюсів знайдене значення $\lambda_{\max}$ потрібно помножити на поправковий коефіцієнт k_4 , поданий в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Значення поправкового коефіцієнта k_4

$D_{н1}$, мм	Коефіцієнт k_4 за		
	$2p = 2$	$2p = 6$	$2p = 8, 2p = 10, 2p = 12$
80...700	0,95	1,05	1,1

Якщо вийде, що $\lambda > \lambda_{\max}$, то потрібно перейти на більшу стандартну висоту осі обертання h і повторити розрахунок головних розмірів і λ .

Магнітопроводи статора і ротора складають з окремих відштампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, марка якої залежить від висоти осі обертання h з відповідним коефіцієнтом заповнення сталі $k_c = 0,97$ для марки сталі 2013, яка використовується для двигунів з висотами обертання $h = 50...250$ мм.

Кількість пазів магнітопроводу статора:

$$z_1 = 2p m_1 q_1, \quad (1.14)$$

де q_1 – кількість пазів на полюс і фазу, вибирається з табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Вибір кількості пазів на полюс і фазу q_1

h , мм	Значення q_1 за умови			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
50...132	3; 4	2; 3	2; 3	1,5; 2
160...225	5; 6	3; 4	3; 4	2; 3
250...450	7; 8	4; 5	4; 5	3; 4

Кількість пазів магнітопроводу короткозамкненого ротора z_2 вибирається з табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Вибір кількості пазів магнітопроводу ротора z_2

h , мм	z_1 / z_2 за умови			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
50...63	24 / 19	24 / 18	36 / 28	–
71	24 / 19	24 / 18	36 / 28	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
180...200	36 / 28	48 / 38	72 / 58	72 / 58
225	36 / 28	48 / 38	72 / 56	72 / 56
250	48 / 40	60 / 50	72 / 56	72 / 56

Зовнішній діаметр магнітопроводу ротора, мм:

$$D_{n2} = D_1 - 2 \cdot \delta, \quad (1.15)$$

де δ – повітряний зазор між статором і ротором, мм.

Значення δ наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Вибір повітряного зазору між статором і ротором δ

h , мм	δ , мм за $2p$			h , мм	δ , мм за $2p$		
	2	4	6 і 8		2	4	6 і 8
112	0,5	0,3	0,3	200	1	0,7	0,5
132	0,6	0,35	0,35	225	1	0,85	0,6
160	0,8	0,5	0,5	250	1,2	1	0,7
180	1	0,6	0,45	280	1,3	1	0,8

Внутрішній діаметр листів ротора за умови $h \geq 71$ мм, мм:

$$D_2 \approx 0,23 \cdot D_{n1}. \quad (1.16)$$

Значення D_2 округлюють до найближчого цілого числа.

В двигунах з $h \geq 250$ мм в магнітопроводі ротора передбачають круглі аксіальні вентиляційні канали відповідно до табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Кількість n_{k2} і діаметр d_{k2} (мм) вентиляційних каналів в магнітопроводі ротора за різних значень $2p$

h , мм	Кількість n_{k2} і діаметр d_{k2} (мм) вентиляційних каналів за різних значень $2p$					
	2		4		6	
	n_{k2}	d_{k2}	n_{k2}	d_{k2}	n_{k2}	d_{k2}
250	10	15	10	20	10	30

Довжину магнітопроводу ротора l_2 , мм вибирають

– для $h \leq 250$ мм:

$$l_2 = l_1; \quad (1.17)$$

– для $h > 250$ мм:

$$l_2 = l_1 + 5. \quad (1.18)$$

За умови $l_2 > 350$ мм в роторі виконують радіальні вентиляційні канали такі самі, як і в статорі.

2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК

2.1 Обмотка статора

Зазвичай обмотка статора має шість фазових зон, зсунутих на 60 ел. град. За таких умов коефіцієнт розподілу:

$$k_{p1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (2.1)$$

де α – кут зсуву між сусідніми пазами:

$$\alpha = \frac{60}{q_1}. \quad (2.2)$$

Одношарову обмотку виконують з діаметральним кроком за пазами:

$$y_1 = \tau = \frac{z_1}{2p}, \quad (2.3)$$

де τ – полюсне ділення.

Двошарова обмотка виконується з укороченим кроком:

$$y_1 = \frac{\beta_1 z_1}{2p}, \quad (2.4)$$

де β_1 – укорочення кроку, яке вибирається таким чином, щоб y_1 дорівнювало цілому числу. За $2p = 2$ $\beta_1 \approx 0,6$, а за $2p \geq 4$ $\beta_1 \approx 0,8$.

Розраховане значення y_1 округлюється до найближчого цілого числа $y_{1\partial}$, після чого розраховується дійсне значення:

$$\beta_{1\partial} = \frac{y_{1\partial}}{\tau}. \quad (2.5)$$

Коефіцієнт укорочення кроку:

$$k_{y1} = \sin(\beta_{1\partial} \cdot 90^\circ). \quad (2.6)$$

Для одношарової обмотки $k_{y1} = 1$.

Обмотувальний коефіцієнт:

$$k_{o\phi 1} = k_{p1} k_{y1}. \quad (2.7)$$

Попереднє значення магнітного потоку, Вб:

$$\Phi = \frac{B_{\delta} D_1 l_1 \cdot 10^{-6}}{p}. \quad (2.8)$$

Попередня кількість витків в фазі:

$$w_1 = \frac{k_n U_{1\phi}}{4,44 f_1 k_{o\phi 1} \Phi}. \quad (2.9)$$

Попередня кількість ефективних провідників в пазу:

$$N_{n1} = \frac{w_1 a_1}{p q_1}, \quad (2.10)$$

де a_1 – кількість паралельних віток в фазі обмотки статора, яка залежить від типу обмотки та від числа полюсів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Вибір кількості паралельних віток в фазі обмотки статора

Тип обмотки	Значення a_1 , шт.			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
Одношарова	1	1; 2	1; 3	1; 2; 4
Двошарова	1; 2	1; 2; 4	1; 2; 3; 6	1; 2; 4; 8

Потрібно починати розрахунок з мінімального значення $a_1 = 1$.
Отримане значення N_{n1} округлюється до:

- найближчого цілого числа $N_{n1\phi}$ для одношарової обмотки;
- найближчого цілого парного числа $N_{n1\phi}$ для двошарової обмотки.

Якщо $N_{n1} \leq 10$, то потрібно збільшувати a_1 .

Для вибраного $N_{n1\phi}$ знаходять уточнені значення:

$$w_{1\partial} = \frac{N_{n1\partial} p q_1}{a_1}; \quad (2.11)$$

$$\Phi_{\partial} = \Phi \cdot \frac{w_1}{w_{1\partial}}; \quad (2.12)$$

$$B_{\delta\partial} = B_{\delta} \cdot \frac{w_1}{w_{1\partial}}. \quad (2.13)$$

Попереднє значення номінального фазного струму:

$$I_{1н} = \frac{P_2 \cdot 10^3}{3U_{1\phi} \eta \cos \varphi}. \quad (2.14)$$

Уточнене лінійне навантаження статора, А/см:

$$A_{1\partial} = \frac{10N_{n1\partial} z_1 I_{1н}}{\pi D_1 a_1}. \quad (2.15)$$

Отримане значення $A_{1\partial}$ не має відрізнятися від попередньо вибраного значення A_1 більше 10 %. В іншому випадку потрібно змінити кількість витків w_1 .

Далі наводиться розрахунок для обмотки статора з трапецеїдальними напівзакритими пазами (рис. 2.1).

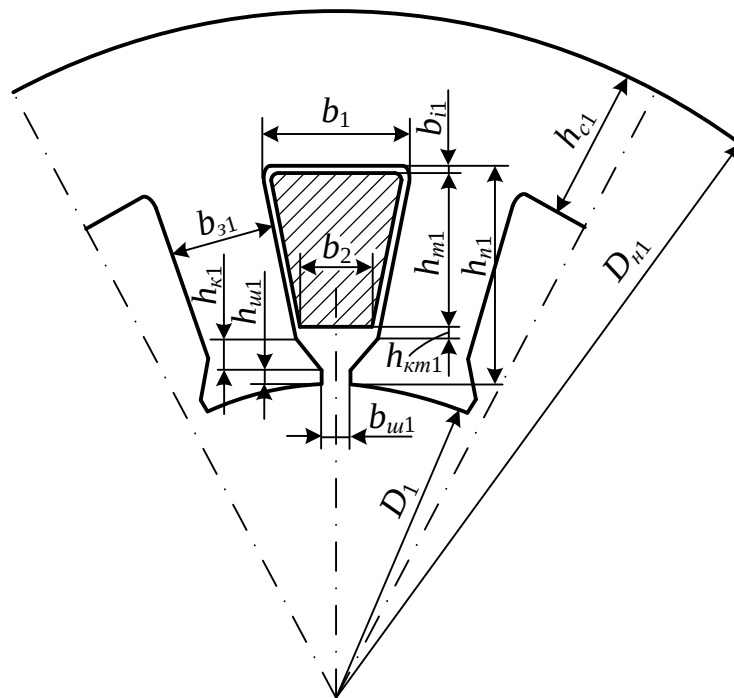


Рисунок 2.1 – Трапецеїдальний паз статора

За напівзакритих пазів трапецеїдальної форми розміри b_1 і b_2 вибирають з умови, щоб ширина зубця $b_{з1}$ залишалась постійною по всій його висоті ($b_{з1} = \text{const}$).

Пазове ділення по внутрішньому діаметру, мм:

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{z_1}. \quad (2.16)$$

Середнє значення магнітної індукції в спинці статора B_{c1} вибирається з табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Середнє значення магнітної індукції в спинці статора B_{c1}

h , мм	$2p$	B_{c1} , Тл
50...250	2; 4	1,55...1,75
	6	1,4...1,6
	8	1,1...1,3

Середнє значення магнітної індукції в зубцях статора $B_{з1}$ вибирається з табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Середнє значення магнітної індукції в зубцях статора $B_{з1}$

h , мм	$2p$	$B_{з1}$ для двигунів із захистом, Тл	
		IP44	IP23
50...132	2; 4; 6; 8	1,75...1,95	1,8...2
160...250	2	1,75...1,95	1,9...2,1
	4; 6; 8	1,6...1,8	1,7...1,9

Ширина зубця, мм:

$$b_{з1} = \frac{t_1 B_{\delta\delta}}{k_c B_{з1}}. \quad (2.17)$$

Розміри трапецеїдальних пазів виконують в такій послідовності:

– висота спинки статора, мм:

$$h_{c1} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2k_c l_1 B_{c1}}; \quad (2.18)$$

– висота паза, мм:

$$h_{n1} = \frac{D_{n1} - D_1}{2} - h_{c1}; \quad (2.19)$$

– більша ширина паза, мм:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{n1})}{z_1} - b_{z1}; \quad (2.20)$$

– менша ширина паза, мм:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{u1} - b_{u1}) - z_1 b_{z1}}{z_1 - \pi}, \quad (2.21)$$

де h_{u1} – висота шліца ($h_{u1} = 0,5$ мм);

b_{u1} – ширина шліца, мм:

$$b_{u1} \approx 0,3\sqrt{h}. \quad (2.22)$$

Для перевірки правильності визначення b_1 і b_2 , виходячи з умови $b_{z1} = \text{const}$, має виконуватися умова:

$$z_1 \cdot (b_1 - b_2) + \pi \cdot (b_2 - b_{u1}) - 2\pi \cdot (h_{n1} - h_{u1}) \approx 0. \quad (2.23)$$

Площа поперечного перерізу паза в штампі, мм²:

$$S_{n1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left(h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} \right). \quad (2.24)$$

Площа поперечного перерізу паза в світлі, мм²:

$$S'_{n1} = \left(\frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left(h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} - h_c \right), \quad (2.25)$$

де b_c і h_c – припуски на збір магнітопроводів статора і ротора двигунів через зміщення листів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Значення припусків b_c і h_c

h , мм	Значення	
	b_c , мм	h_c , мм
50...132	0,1	0,1
160...250	0,2	0,2

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції, мм²:

$$S_i = b_{i1} \cdot (2h_{n1} + b_1 + b_2), \quad (2.26)$$

де b_{i1} – середнє значення односторонньої товщини корпусної ізоляції, мм (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Середнє значення односторонньої товщини корпусної ізоляції b_{i1}

h , мм	90...132	160...250
b_{i1} , мм	0,25	0,4

Площа поперечного перерізу прокладок (між шарами, на дні паза і під клином), мм²:

$$S_{np} = 0,5b_1 + 0,75b_2. \quad (2.27)$$

Площа поперечного перерізу паза, зайнята обмоткою, мм²:

$$S''_{n1} = S'_{n1} - S_i - S_{np}. \quad (2.28)$$

Коефіцієнт заповнення паза обмоткою:

$$k_n = \frac{N_{n1} \cdot c \cdot d'^2}{S''_{n1}}, \quad (2.29)$$

де c – кількість елементарних (паралельних) проводів в одному ефективному;

d' – діаметр елементарного ізолюваного проводу, мм.

Коефіцієнт заповнення паза k_n не має перевищувати **0,75** за ручного укладання і **0,72** – за машинного.

Кількість паралельних проводів c вибирають з умови, щоб діаметр проводу з ізоляцією d' не перевищував **1,71** мм за ручного укладання і **1,33** мм – за машинного.

Задавшись значенням k_n , з формули (2.29) визначають діаметр ізолюваного проводу:

$$d' = \sqrt{\frac{k_n S_{n1}''}{N_{n1\phi} \cdot c}}. \quad (2.30)$$

Розрахунок починають з $c = 1$, а якщо ще й d' перевищить допустимі значення, то переходять до $c = 2$ і так далі.

З табл. 2.6 підбирають найближчий до розрахованого стандартний діаметр ізолюваного проводу d' , діаметр неізолюваного проводу d і його переріз S . Для обмоток статора використовують проводи марки ПЭТВ (клас ізоляції В) і ПЭТ-155 (клас ізоляції F).

Таблиця 2.6 – Визначення параметрів проводу

d , мм	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
S , мм ²	0,00283	0,00385	0,00503	0,00636	0,00785	0,0095	0,01131	0,01327
d' , мм	0,08	0,09	0,1	0,11	0,122	0,132	0,142	0,152
d , мм	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21
S , мм ²	0,01539	0,1767	0,0201	0,0227	0,0255	0,0284	0,0314	0,0346
d' , мм	0,162	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
d , мм	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,38
S , мм ²	0,0415	0,0491	0,0573	0,0661	0,0755	0,0855	0,0962	0,1134
d' , мм	0,265	0,285	0,305	0,325	0,345	0,365	0,39	0,42
d , мм	0,41	0,44	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57
S , мм ²	0,132	0,1521	0,1735	0,1886	0,204	0,221	0,238	0,255
d' , мм	0,45	0,48	0,51	0,53	0,565	0,585	0,605	0,625
d , мм	0,59	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72	0,74	0,77
S , мм ²	0,273	0,302	0,322	0,353	0,374	0,407	0,43	0,466
d' , мм	0,645	0,675	0,7	0,73	0,75	0,78	0,805	0,835
d , мм	0,8	0,83	0,86	0,9	0,93	0,96	1	1,04
S , мм ²	0,503	0,541	0,581	0,636	0,679	0,724	0,785	0,849
d' , мм	0,865	0,895	0,925	0,965	0,995	1,025	1,08	1,12

Продовження таблиці 2.6

d , мм	1,08	1,12	1,16	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4
S , мм ²	0,916	0,985	1,057	1,131	1,227	1,327	1,431	1,539
d' , мм	1,16	1,2	1,24	1,28	1,33	1,385	1,435	1,485
d , мм	1,45	1,5	1,56	1,62	1,68	1,74	1,81	1,88
S , мм ²	1,651	1,767	1,911	2,06	2,22	2,38	2,57	2,78
d' , мм	1,535	1,585	1,645	1,705	1,765	1,825	1,905	1,975
d , мм	1,95	2,02	2,1	2,26	2,44			
S , мм ²	2,99	3,2	3,46	4,01	4,68			
d' , мм	2,045	2,115	2,2	2,36	2,54			

В подальших розрахунках використовуються лише вибрані стандартні розміри проводу.

Після цього уточнюють (дійсне) значення коефіцієнта заповнення паза за формулою (5.29) та ширину шліца, мм:

$$b_{u1\partial} = d' + 2b_{i1} + 0,4. \quad (2.31)$$

Якщо за результатами розрахунків $b_{u1} > b_{u1\partial}$, то вибирають $b_{u1\partial} = b_{u1}$, якщо ж $b_{u1} < b_{u1\partial}$, то вибирають $b_{u1} = b_{u1\partial}$ і знаходять уточнені значення величин за формулами (2.21), (2.23 – 2.25), (2.28), (2.30).

Густина струму в обмотці статора, А/мм²:

$$\Delta_{1n} = \frac{I_{1n}}{c \cdot S \cdot a_1}. \quad (2.32)$$

Добуток лінійного навантаження на густину струму $A_{1\partial}\Delta_{1n}$ характеризує питоме теплове навантаження статора.

Для обмотки статора, яка розраховується, знаходять цей добуток і порівнюють з допустимим значенням $(A_{1\partial}\Delta_{1n})_{don}$ з рис. 2.2, яке відповідає двигуну з ізоляцією класу F за умови $2p = 4$ і синхронною швидкістю обертання 1500 об/хв.

У випадку ізоляції класів В і Н отримане з рис. 2.2 значення $A_{1\partial}\Delta_{1n}$ множать на коефіцієнт:

- **0,75** для класу В;
- **1,3** для класу Н.

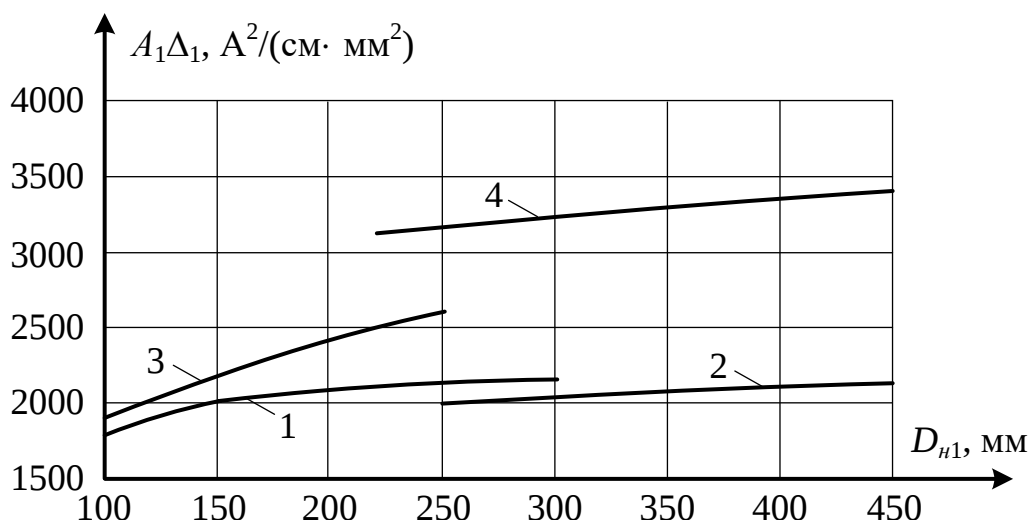


Рисунок 2.2 – Середні допустимі значення $A_{10}\Delta_{1н}$:

- 1 – IP44, IC0141, напівзакриті пази, одношарова обмотка;
- 2 – те саме, що і 1, але двошарова обмотка;
- 3 – IP23, IC01, напівзакриті пази, одношарова обмотка;
- 4 – те саме, що і 3, але двошарова обмотка

За швидкостей обертання, більших або менших за 1500 об/хв, отримане значення потрібно додатково домножити на коефіцієнт k_5 , який вибирається з табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Значення коефіцієнта k_5

Ступінь захисту	$D_{н1}, \text{мм}$	Значення коефіцієнта k_5 для $2p$			
		2	4	6	8
IP44	80...240	0,78	1	1	1
	280...500	1	1	1	1
IP23	280...500	1,07	1	0,89	0,84

Якщо отримане за результатами розрахунків значення $A_{10}\Delta_{1н}$ перевищує допустиме значення $(A_{10}\Delta_{1н})_{дон}$ більше ніж на 15 %, то потрібно:

➤ або збільшити площі поперечних перерізів проводу S і паза $S''_{н1}$, зменшуючи розміри h_{c1} і $b_{з1}$, але щоб B_{c1} і $B_{з1}$ не перевищували допустимих значень;

➤ або подовжувати магнітопроводи статора й ротора, що приведе до збільшення магнітного потоку Φ і зменшення кількості провідників в пазу $N_{н1}$.

Розміри обмотки розраховують в такій послідовності:

– середнє зубцеве ділення статора, мм:

$$t_{cp1} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{n1})}{z_1}; \quad (2.33)$$

– середня ширина котушки, мм:

$$b_{cp1} = t_{cp1} y_{1\delta}; \quad (2.34)$$

– середня довжина лобової частини котушки, мм:

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14p) \cdot b_{cp1} + 15; \quad (2.35)$$

– середня довжина витка, мм:

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_1 + l_{л1}); \quad (2.36)$$

– довжина вильоту лобової частини, мм:

➤ за $h \leq 132$ мм:

$$l_{e1} = (0,19 + 0,1p) \cdot b_{cp1} + 10; \quad (2.37)$$

➤ за $h \geq 160$ мм:

$$l_{e1} = (0,12 + 0,15p) \cdot b_{cp1} + 10. \quad (2.38)$$

2.2 Обмотка короткозамкненого ротора

Стрижні короткозамкненої обмотки зазвичай розміщуються в пазах овальної форми (рис. 2.3) за умови:

➤ $h \leq 132$ мм – напівзакритого типу;

➤ $h \geq 160$ мм – закритого типу.

Радіуси r_1 і r_2 вибирають такими, щоб стінки зубців були паралельними ($b_{з2} = \text{const}$) на всій висоті h_{y2} .

Попередні значення висоти паза h_{n2} визначаються з рис. 2.4. Водночас потрібно мати на увазі, що зі збільшенням h_{n2} зменшується висота спинки

ротора h_{c2} і збільшується індукція B_{c2} в ній, граничне значення якої не має перевищувати 1,6 Тл.

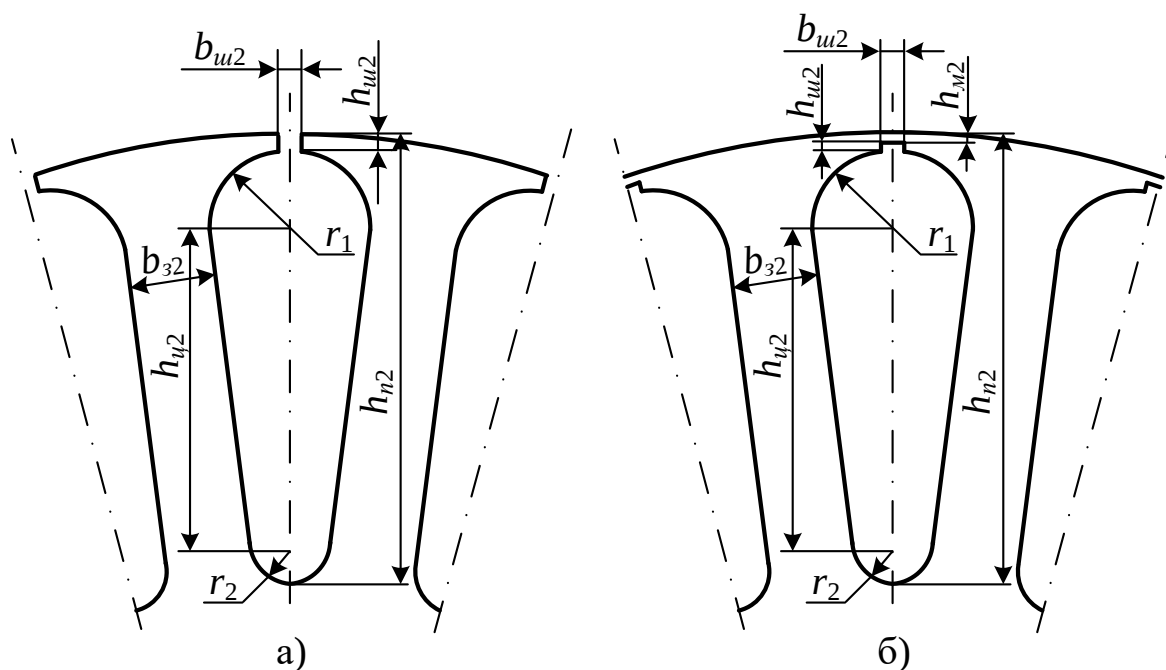


Рисунок 2.3 – Пази короткозамкненого ротора:
а) овальний напівзакритий; б) овальний закритий

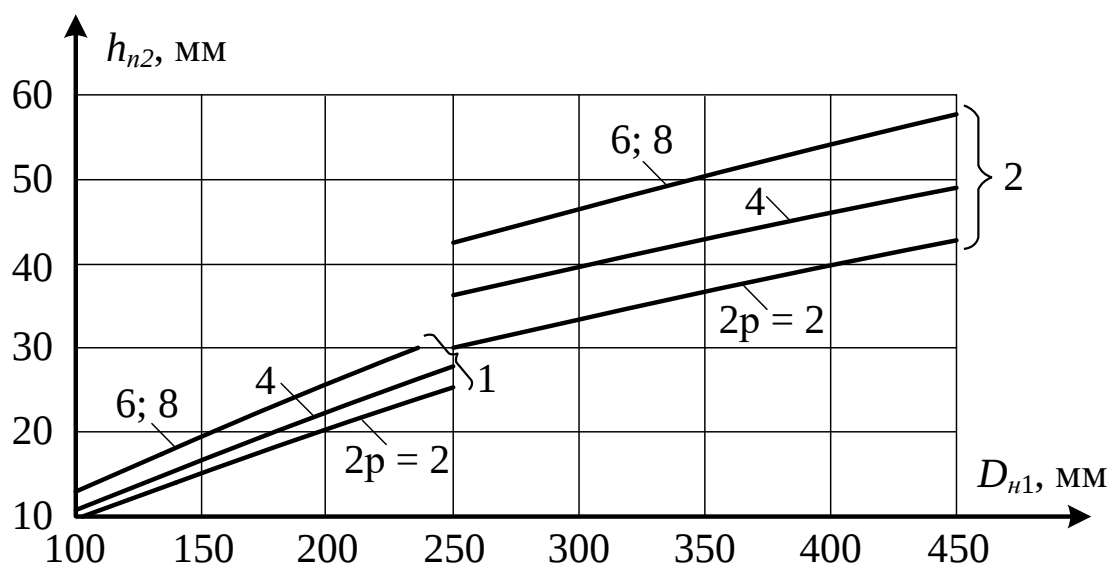


Рисунок 2.4 – Середні значення висоти паза h_{n2} короткозамкненого ротора:
1 – ротор з овальними напівзакритими пазами;
2 – ротор з овальними закритими пазами

Якщо під час перевірки значення $B_{c2} > 1,6$ Тл, то висоту паза h_{n2} , взяту з рис. 2.4, знижують.

Попереднє значення індукції в зубцях ротора B_{32} визначають з табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Значення індукції в зубцях ротора B_{32}

h , мм	$2p$	B_{32} , Тл для двигунів зі ступенем захисту	
		IP44	IP23
50...132	2; 4; 6; 8	1,6...1,8	1,85...2,05
160...250	2	1,75...1,95	1,85...2,05
	4; 6; 8	1,7...1,9	1,75...1,95

Визначення розмірів пазів здійснюється в такій послідовності:

– висота паза h_{n2} , мм – з рис. 2.4;

– висота спинки ротора, мм:

➤ для $h \geq 71$ мм за умови $2p = 2$:

$$h_{c2} = 0,58D_{n2} - h_{n2}; \quad (2.39)$$

➤ для $h \geq 71$ мм за умови $2p \geq 4$:

$$h_{c2} = 0,38D_{n2} - h_{n2}; \quad (2.40)$$

– магнітна індукція в спинці ротора, Тл:

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2k_c l_2 h_{c2}}; \quad (2.41)$$

– зубцеве ділення по зовнішньому діаметру ротора, мм:

$$t_2 = \frac{\pi D_{n2}}{z_2}; \quad (2.42)$$

– ширина зубця, мм:

$$b_{32} = \frac{t_2 B_{\delta\delta}}{B_{32} k_c}; \quad (2.43)$$

– менший радіус паза, мм:

$$r_2 = \frac{\pi \cdot (D_{n2} - 2h_{n2}) - z_2 b_{32}}{2 \cdot (z_2 - \pi)}; \quad (2.44)$$

– більший радіус паза, мм:

$$r_1 = \frac{\pi \cdot (D_{n2} - h_{u2} - 2h_{m2}) - z_2 b_{32}}{2 \cdot (z_2 + \pi)}, \quad (2.45)$$

де:

- для напівзакритого паза $h_{u2} = 0,5 \dots 0,75$ мм; $h_{m2} = 0$; $b_{u2} = 1 \dots 1,5$ мм;
- для закритого паза $h_{u2} = 0,7$ мм; $h_{m2} = 0,3$ мм; $b_{u2} = 1,5$ мм.

Якщо за результатами розрахунків вийде, що $r_2 < 1$ (для $h \leq 132$ мм) або $r_2 < 2$ (для $h \geq 160$ мм), то потрібно зменшити b_{32} , збільшивши B_{32} ;

– відстань між центрами радіусів, мм:

$$h_{y2} = h_{n2} - h_{u2} - h_{m2} - r_1 - r_2. \quad (2.46)$$

Перевірка правильності визначення r_1 і r_2 за умови $b_{32} = \text{const}$:

$$\pi h_{y2} - z_2 \cdot (r_1 - r_2) \approx 0; \quad (2.47)$$

– площа поперечного перерізу стрижня (площа поперечного перерізу паза в штампі), мм²:

$$S_{cm} = S_{n2} = 0,5\pi \cdot (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \cdot h_{y2}. \quad (2.48)$$

В двигуні, що проєктується, застосовується лита з алюмінієвого сплаву обмотка ротора з литим короткозамкненим кільцем і лопатками вентилятора (рис. 2.5).

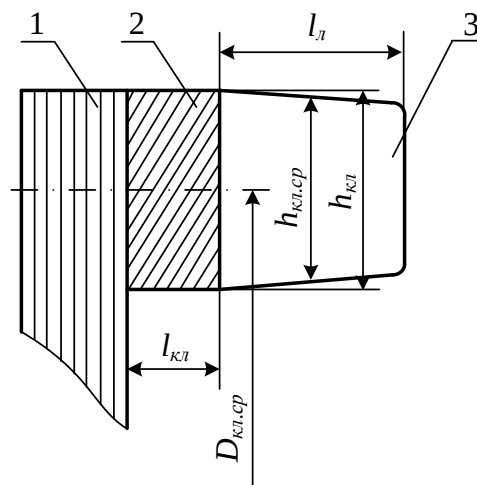


Рисунок 2.5 – Короткозамкнені кільця ротора:
1 – магнітопровід ротора; 2 – кільце; 3 – лопатка

Розміри кільця знаходять в такій послідовності:

– поперечний переріз кільця, мм²:

$$S_{кл} = \frac{(0,35...0,45) \cdot z_2 \cdot S_{см}}{2p}; \quad (2.49)$$

– висота кільця, мм:

$$h_{кл} = (1,1...1,2)h_{н2}; \quad (2.50)$$

– довжина кільця, мм:

$$l_{кл} = \frac{S_{кл}}{h_{кл}}; \quad (2.51)$$

– середній діаметр кільця, мм:

$$D_{кл.ср} = D_{н2} - h_{кл}; \quad (2.52)$$

– виліт лобової частини обмотки, мм:

$$l_{в2} = k_l l_{л2} + l_{кл}, \quad (2.53)$$

де k_l – коефіцієнт, що враховує згин стрижня ($k_l = 0,9$);

$l_{л2}$ – довжина лобової частини стрижня ($l_{л2} = 50$ мм).

3 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА

3.1 Загальні положення

Асинхронний двигун має симетричне магнітне коло, а тому розрахунок магніторушійних сил (МРС) виконується на один полюс.

Магнітне коло двигуна складається з п'яти ділянок, з'єднаних послідовно: 1) повітряного зазору δ між статором і ротором; 2) зубців статора; 3) зубців ротора; 4) спинки статора; 5) спинки ротора.

Під час розрахунку магнітної напруги кожної ділянки вважають, що магнітна індукція на ділянці розподілена рівномірно.

Послідовність розрахунку магнітного кола: для кожної ділянки визначають її площу поперечного перерізу, магнітну індукцію, напруженість поля, середню довжину шляху магнітного потоку, МРС ділянки, сумарну МРС двигуна. Сумарна МРС розраховується для номінального режиму роботи, у цьому випадку індукція в повітряному зазорі вважається синусоїдною.

Насичення магнітного кола викликає сплюснення кривої поля. Що означає, що за підвищеної індукції магнітний опір зубців по середині полюсного ділення більший, ніж по краях. Тому таблиці намагнічування $H = f(B)$ для зубців статора і ротора складено з врахуванням цього явища. Для спинок статора і ротора таблиці намагнічування складено з врахуванням синусоїдного розподілу індукції.

Наявність пазів в статорі та роторі призводить до додаткового збільшення МРС повітряного зазору, що враховується відповідними коефіцієнтами повітряного зазору, більшими одиниці.

За наявності радіальних вентиляційних каналів в магнітопроводах статора і ротора частина магнітного потоку проходить через канали, знижуючи магнітний опір повітряного зазору. Це враховується коефіцієнтом k_k , меншим одиниці.

За магнітної індукції в зубцях $B_z \leq 1,8$ Тл вважають, що магнітний потік проходить лише через зубці. Напруженість поля визначають за відповідною таблицею $H = f(B)$ для зубців. За умови $B_z > 1,8$ Тл частина магнітного потоку проходить через пази, зменшуючи дійсну індукцію в зубцях. Це зниження враховується зубцевим коефіцієнтом k_z , що залежить від площ поперечних перерізів зубця і паза, а для знаходження H користуються кривими, розрахованими для різних значень k_z .

За наявності в магнітопроводах статора радіальних вентиляційних каналів значення коефіцієнта k_3 потрібно помножити на відношення $l_1/(l_1 - n_{k1}l_{k1})$.

3.2 Розрахунок МРС ділянок магнітного кола

3.2.1 МРС повітряного зазору

Коефіцієнти повітряного зазору статора і ротора:

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{u1\delta}}{t_1 - b_{u1\delta} + \frac{5\delta t_1}{b_{u1\delta}}}, \quad (3.1)$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{u2}}{t_2 - b_{u2} + \frac{5\delta t_2}{b_{u2}}}. \quad (3.2)$$

За відкритих пазів в (3.1) і (3.2) замість b_{u1} і b_{u2} потрібно підставити відповідно b_{n1} і b_{n2} .

Коефіцієнт, що враховує зменшення магнітного опору повітряного зазору за:

- відсутності радіальних каналів (довжина магнітопроводів l_1 і l_2 менша 300...350 мм) $k_k = 1$;
- наявності каналів на статорі і роторі, що збігаються:

$$k_k = 1 - \frac{1,5\delta}{l_n + 1,5\delta \cdot \left(1 + \frac{l_n}{l_k}\right)}, \quad (3.3)$$

де l_n – довжина пакета ($l_n = l_{n1} = l_{n2}$);

l_k – довжина каналу.

Спільний коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_k. \quad (3.4)$$

МРС повітряного зазору, А:

$$F_{\delta} = 0,8\delta k_{\delta} B_{\delta\delta} \cdot 10^3. \quad (3.5)$$

3.2.2 МРС зубців статора

МРС для зубців за трапецеїдальних напівзакритих пазів статора.

За умови $B_{\Sigma 1} \leq 1,8$ Тл напруженість магнітного поля в зубцях статора $H_{\Sigma 1}$ визначається з табл. 3.1, в якій приведено залежність $H_z = f(B_z)$ для сталі 2013. Ця ж таблиця справедлива і для зубців ротора.

Таблиця 3.1 – Залежність $H = f(B)$ для зубців статора (сталь 2013)

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{А/см}$									
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	2,4	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	3,2
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	3,8	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,30	4,63	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	6,1	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	6,96
1,5	7,09	7,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	8,50	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	14,4	14,8
1,8	15,2	15,7	16,2	16,7	17,2	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1
1,9	20,7	21,6	22,5	23,4	24,3	25,2	26,4	27,6	28,9	30,2
2,0	31,5	33,2	35,0	36,8	38,6	40,4	42,6	44,8	47,0	49,2
2,1	51,4	54,4	57,4	60,5	63,6	66,7	71,2	75,7	80,2	84,7
2,2	59,2	94,3	99,4	104,6	109,8	115	120	126	132	138
2,3	144	151	158	165	172	180	188	196	205	214

За умови $B_{з1} > 1,8$ Тл:

– зубцеве ділення на $1/3$ висоти зубця, мм:

$$t_{1(1/3)} = \frac{\pi \cdot \left(D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{n1} \right)}{z_1}; \quad (3.6)$$

– зубцевий коефіцієнт статора:

$$k_{з1(1/3)} = \frac{t_{1(1/3)}}{b_{з1} k_c} - 1; \quad (3.7)$$

– напруженість магнітного поля $H_{з1}$, А/см визначають з рис. 3.1.

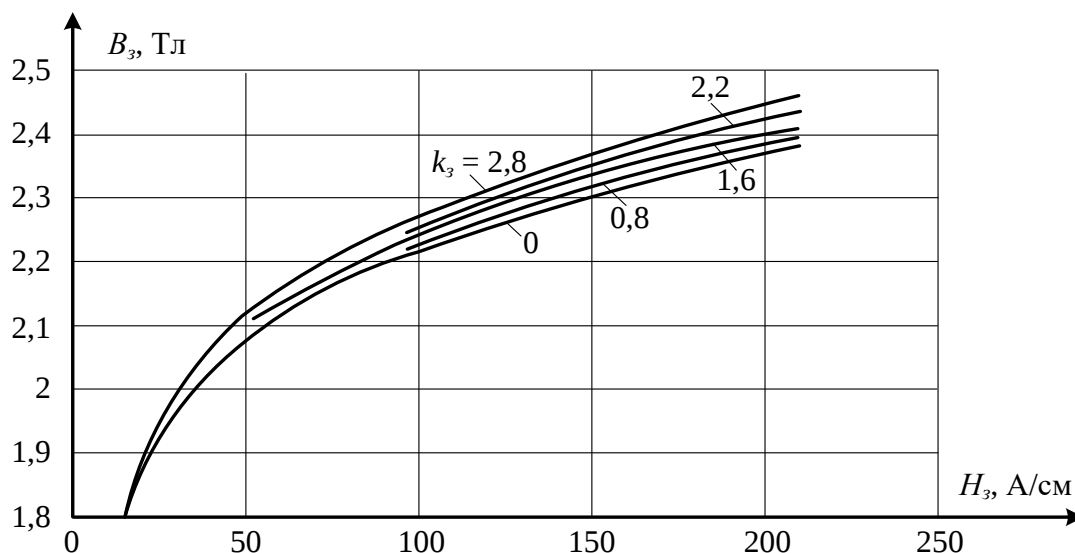


Рисунок 3.1 – Криві намагнічування для зубців
за $B_z > 1,8$ Тл для сталі 2013

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм:

$$L_{з1} = h_{n1}. \quad (3.8)$$

МРС зубців статора, А:

$$F_{з1} = 0,1 H_{з1} L_{з1}. \quad (3.9)$$

3.2.3 МРС зубців ротора

Враховуємо, що пази ротора є напівзакритими або закритими овальної форми.

За умови $B_{32} \leq 1,8$ Тл напруженість магнітного кола H_{32} , А/см, вибирається з табл. 3.1.

За умови $B_{32} > 1,8$ Тл:

– зубцеве ділення на $1/3$ висоти зубця, мм:

$$t_{2(1/3)} = \frac{\pi \cdot \left(D_{n2} - \frac{4}{3} \cdot h_{n2} \right)}{z_2}; \quad (3.10)$$

– зубцевий коефіцієнт ротора:

$$k_{32(1/3)} = \frac{t_{2(1/3)}}{b_{32} k_c} - 1; \quad (3.11)$$

– напруженість магнітного кола, А/см: H_{32} вибирається з рис. 3.1.

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм:

$$L_{32} = h_{n2} - 0,2r_2. \quad (3.12)$$

МРС зубців ротора, А:

$$F_{32} = 0,1H_{32}L_{32}. \quad (3.13)$$

3.2.4 МРС спинки статора

Напруженість магнітного поля в спинці статора H_{c1} , А/см:

- при $2p = 2; 4; 6; 8$ і $B_{c1} \leq 1,4$ Тл – визначається з табл. 3.2;
- при $2p = 2$ і $B_{c1} > 1,4$ Тл – визначається з табл. 3.3. При цьому значення B_{c1} , вибране з табл. 2.2, зменшують на 0,4 Тл.

Таблиця 3.2 – Залежність $H = f(B)$ для спинки статора (сталь 2013)

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H , А/см									
0,4	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62
0,5	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74	0,76	0,78
0,6	0,80	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97
0,7	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11	1,13	1,15	1,18	1,21

Продовження таблиці 3.2

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{ A/cm}$									
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	23,2	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2
1,9	35,7	40,3	40,3	42,6	44,9	47,2	49,3	51,4	53,5	55,6
2,0	57,7	63,0	63,0	66,0	70,0	74,0	79,0	84,0	90,0	97,0

Таблиця 3.3 – Залежність $H = f(B)$ (сталь 2013)

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{ A/cm}$									
0,4	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62
0,5	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
0,6	0,70	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,8	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,00	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	2,9
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,8

Продовження таблиці 3.3

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, \text{ A/см}$									
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
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
1,9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2,0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2,1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм:

$$L_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{H1} - h_{c1})}{4p}. \quad (3.14)$$

МРС спинки статора, А:

$$F_{c1} = 0,1 H_{c1} L_{c1}. \quad (3.15)$$

3.2.5 МРС спинки ротора

Напруженість магнітного поля спинки ротора, А/см:

- за $2p = 2 H_{c2}$ визначається з табл. 3.2;
- за $2p \geq 4 H_{c2}$ визначається з табл. 3.3.

Середня довжина магнітного потоку, мм:

- за $2p = 2$:

$$L_{c2} = h_{c2} + \frac{2}{3} \cdot d_{k2}; \quad (3.16)$$

- за $2p \geq 4$:

$$L_{c2} = \frac{\pi \cdot \left(D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3} \cdot d_{\kappa 2} \right)}{4p}. \quad (3.17)$$

Діаметр $d_{\kappa 2}$ (мм) вентиляційних каналів в магнітопроводі ротора вибирають з табл. 1.8.

МРС спинки ротора:

$$F_{c2} = 0,1 H_{c2} L_{c2}. \quad (3.18)$$

3.2.6 Параметри магнітного кола

Сумарна МРС магнітного кола на один полюс, А:

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2}. \quad (3.19)$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола:

$$k_{nac} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}}. \quad (3.20)$$

Струм намагнічування, А:

$$I_M = \frac{2,22 F_{\Sigma} p}{m_1 w_{10} k_{об1}}. \quad (3.21)$$

Струм намагнічування у відносних одиницях:

$$I_M^* = \frac{I_M}{I_{1н}}. \quad (3.22)$$

ЕРС холостого ходу, В:

$$E_{10н} = k_n U_{1н}. \quad (3.23)$$

Головний індуктивний опір, Ом:

$$X_M = \frac{E_{10н}}{I_M}. \quad (3.24)$$

Головний індуктивний опір у відносних одиницях:

$$X_{\text{м}}^* = X_{\text{м}} \cdot \frac{I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}}. \quad (3.25)$$

4 АКТИВНІ ТА ІНДУКТИВНІ ОПОРИ ОБМОТОК

4.1 Загальні положення

Активні опори обмоток розраховують для температури 20 °С, а під час визначення втрат їх приводять до стандартної робочої температури 120 °С (для класу ізоляції В) і 140 °С (для класу ізоляції F) за максимальної температури навколишнього середовища 40 °С.

Магнітне поле в процесі розрахунку індуктивних опорів умовно розбивають на три складові: пазове розсіювання; диференціальне розсіювання; розсіювання лобових частин обмоток. Для кожної складової визначають магнітну провідність, їм відповідають відповідні коефіцієнти провідності: пазовий $\lambda_{\text{п}}$; диференціальний $\lambda_{\text{д}}$; лобових частин обмоток $\lambda_{\text{л}}$.

Отримані провідності підсумовують і за отриманим результатом розраховують індуктивні опори обмоток.

Різним режимам роботи двигуна відповідають свої значення приведенного активного опору R'_2 та приведенного індуктивного опору X'_2 обмотки ротора, а також індуктивного опору X_1 обмотки статора.

Правильність розрахунку індуктивних опорів може бути наближено перевірена за відношенням:

$$\frac{X_1}{X'_2} = 0,7 \dots 1,0. \quad (4.1)$$

4.2 Опір обмотки статора

Активний опір обмотки фази за 20 °С, Ом:

$$R_{1(20)} = \frac{w_{1\phi} l_{cp1}}{\gamma_{\text{м}(20)} a_1 c S \cdot 10^3}. \quad (4.2)$$

де $\gamma_{\text{м}(20)}$ – питома електрична провідність міді за 20 °С ($\gamma_{\text{м}(20)} = 57 \text{ См/мкм}$).

Активний опір обмотки фази за 20 °С у відносних одиницях:

$$R_{1(20)}^* = R_{1(20)} \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}}. \quad (4.3)$$

Перевірка правильності розрахунку $R_{1(20)}^*$:

$$R_{1(20)}^* = \frac{\pi D_1 \cdot (A_{1\partial} \Delta_{1\partial}) \cdot l_{cp1}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 U_{1H} I_{1H}}. \quad (4.4)$$

Коефіцієнти, що враховують укорочення кроку обмотки:

➤ для $\beta_{1\partial} = 0,65 \dots 1,0$:

$$\begin{aligned} k_{\beta 1} &= 0,4 + 0,6\beta_{1\partial}, \\ k'_{\beta 1} &= 0,2 + 0,8\beta_{1\partial}; \end{aligned} \quad (4.5)$$

➤ для $\beta_{1\partial} < 0,65$:

$$\begin{aligned} k_{\beta 1} &= 0,2 + 0,85\beta_{1\partial}, \\ k'_{\beta 1} &= 1,1\beta_{1\partial}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання для трапецеїдального напівзакритого паза (рис. 2.1):

$$\lambda_{n1} = \frac{h_{m1}}{3b_2} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{3h_{\kappa 1}}{b_2 + 2b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} + \frac{h_{\kappa m1}}{b_2} \right) \cdot k'_{\beta 1}. \quad (4.7)$$

де h_{m1} – розмір обмотки:

$$h_{m1} = h_{n1} - h_{u1} - h_{\kappa 1} - h_{\kappa m1} - h_{i1}, \quad (4.8)$$

де $h_{\kappa 1}$, $h_{\kappa m1}$, h_{i1} – розміри паза (див. рис. 2.1), вибираються з табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри паза

Форма паза статора	Висоти, мм			
	h	$h_{\kappa 1}$	$h_{\kappa m1}$	h_{i1}
напівзакрита	50...132	0,7	0,6	0
	160...250	1		0,4

Коефіцієнт, що враховує вплив відкриття пазів статора на провідність диференційного розсіювання:

$$k_{u1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{u1}^2}{t_1 \cdot \delta}. \quad (4.9)$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання:

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{0,9 \cdot (t_1 k_{o\partial 1})^2 k_{\partial p 1} k_{u1} k_{\partial 1}}{\delta k_{\delta}}, \quad (4.10)$$

де $k_{\partial p 1}$ – коефіцієнт, що враховує демпфувальну реакцію струмів, наведених в обмотці короткозамкненого ротора вищими гармоніками поля статора (вибирається з табл. 4.2);

$k_{\partial 1}$ – коефіцієнт диференційного розсіювання статора (вибирається з табл. 4.3).

В чисельнику табл. 4.2 наведено значення $k_{\partial p 1}$ за наявності скосу пазів на роторі, а в знаменнику – за його відсутності.

Полюсне ділення, мм:

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p}. \quad (4.11)$$

Таблиця 4.2 – Вибір коефіцієнта $k_{\partial p 1}$

q_1	$k_{\partial p 1}$ при значеннях z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
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	–	$\frac{0,90}{0,81}$	$\frac{0,84}{0,77}$	$\frac{0,80}{0,75}$	$\frac{0,77}{0,72}$	–	–
5	–	–	–	$\frac{0,75}{0,69}$	$\frac{0,72}{0,67}$	$\frac{0,7}{0,65}$	–
6	–	–	–	$\frac{0,7}{0,62}$	$\frac{0,66}{0,60}$	$\frac{0,62}{0,58}$	–
8	–	–	–	–	–	$\frac{0,53}{0,47}$	$\frac{0,51}{0,46}$

Таблиця 4.3 – Вибір коефіцієнта $k_{\partial 1}$

Тип обмотки	Значення $k_{\partial 1}$ при q_1							
	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8
одношарова	–	0,0285	–	0,0141	0,0089	0,0065	0,0052	–
двошарова	0,045	0,0235	0,017	0,0111	0,0062	0,0043	0,003	0,0021

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{\text{л1}} - 0,64\beta_{1\partial}\tau). \quad (4.12)$$

Коефіцієнт провідності обмотки статора:

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{н1}} + \lambda_{\partial 1} + \lambda_{\text{л1}}. \quad (4.13)$$

Індуктивний опір розсіювання фази статора, Ом:

$$X_1 = \frac{1,58 f_1 l_1 w_{1\partial}^2 \lambda_1}{p q_1 \cdot 10^8}. \quad (4.14)$$

Індуктивний опір розсіювання фази статора у відносних одиницях:

$$X_1^* = X_1 \cdot \frac{I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}}. \quad (4.15)$$

Перевірка правильності розрахунку X_1^* :

$$X_1^* = \frac{0,39 \cdot (D_1 A_{1\partial})^2 \cdot l_1 \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m_1 U_{1\text{н}} I_{1\text{н}} z_1}. \quad (4.16)$$

4.3 Опір обмотки ротора

Активний опір стрижня за 20 °С, Ом:

$$R_{\text{cm}} = \frac{l_2}{\gamma_{\text{a}(20)} S_{\text{cm}} \cdot 10^3}, \quad (4.17)$$

де $\gamma_{a(20)}$ – питома електрична провідність алюмінію за 20 °С ($\gamma_{a(20)} = 27 \text{ См/мкм}$).

Коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня:

➤ за умови $t_2/2p < 6$:

$$k_{np2} = 2 \sin\left(\frac{\pi p}{z_2}\right); \quad (4.18)$$

➤ за умови $t_2/2p \geq 6$:

$$k_{np2} = \frac{2\pi p}{z_2}. \quad (4.19)$$

Опір короткозамкнених кілець, приведений до струму стрижня за 20 °С, Ом:

$$R_{кл} = \frac{2\pi D_{кл.ср}}{\gamma_{a(20)} z_2 S_{кл} k_{np2}^2 \cdot 10^3}. \quad (4.20)$$

Центральний кут скосу пазів, рад.:

$$\alpha_{ск} = \frac{2pt_1\beta_{ск}}{D_1}, \quad (4.21)$$

де $\beta_{ск} = 1$.

Коефіцієнт скосу пазів ротора: $k_{ск}$ – з рис. 4.1.

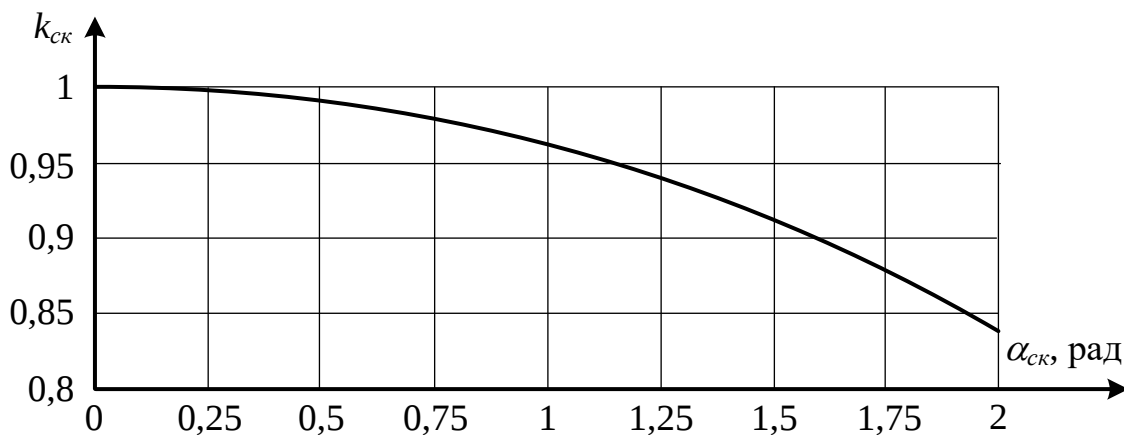


Рисунок 4.1 – Визначення коефіцієнта скосу пазів ротора $k_{ск}$

Коефіцієнт приведення опору обмотки ротора до обмотки статора:

$$k_{np1} = \frac{4m_1}{z_2} \cdot \left(\frac{w_{1\delta} k_{o\delta 1}}{k_{ck}} \right)^2. \quad (4.22)$$

Активний опір обмотки ротора за 20 °С, приведений до обмотки статора, Ом:

$$R'_{2(20)} = k_{np1} \cdot (R_{cm} + R_{кл}). \quad (4.23)$$

Активний опір обмотки ротора за 20 °С, приведений до обмотки статора, у відносних одиницях:

$$R_{2(20)}^* = R'_{2(20)} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}. \quad (4.24)$$

Струм стрижня ротора для номінального режиму, А:

$$I_{2H} = \frac{2w_{1\delta} k_{o\delta 1} P_{2H} \cdot 10^3}{U_{1H} z_2} \cdot \frac{(0,2 + 0,8 \cos \varphi_H)}{\eta_H \cos \varphi}. \quad (4.25)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання:

➤ для напівзакритого паза (рис. 2.3, а):

$$\lambda_{n2} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} + \frac{h_{y2} + 0,8r_2}{6r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{u2}}{4r_1}. \quad (4.26)$$

➤ для закритого паза (рис. 2.3, б):

$$\lambda_{n2} = 1,12 \cdot 10^3 \cdot \frac{h_{m2}}{I_{2H}} + \frac{h_{y2} + 0,8r_2}{6r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{u2}}{4r_1} + 0,3. \quad (4.27)$$

Кількість пазів ротора на полюс і фазу:

$$q_2 = \frac{z_2}{2pm_1}. \quad (4.28)$$

Коефіцієнт диференційного розсіювання ротора $k_{\partial 2}$ – з рис. 4.2.

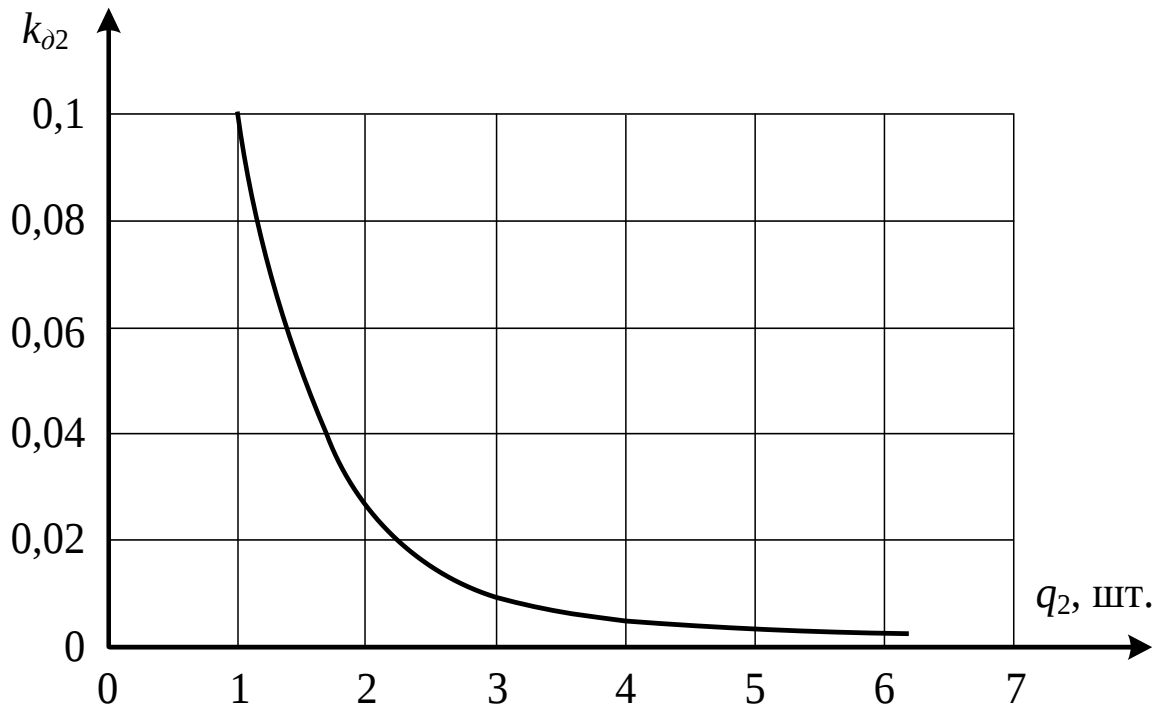


Рисунок 4.2 – Визначення коефіцієнта диференційного розсіювання ротора $k_{\partial 2}$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання:

$$\lambda_{\partial 2} = 0,9 t_2 \cdot \left(\frac{z_2}{6p} \right)^2 \cdot \frac{k_{\partial 2}}{\delta k_{\delta}}. \quad (4.29)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання короткозамкнених кілець литої клітки ротора:

$$\lambda_{кл} = \frac{2,9 D_{кл.ср}}{z_2 l_2 k_{np2}^2} \cdot \lg \left(\frac{2,35 D_{кл.ср}}{h_{кл} + l_{кл}} \right). \quad (4.30)$$

Відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого ділення ротора:

$$\beta_{ск2} = \beta_{ск} \cdot \frac{t_1}{t_2}. \quad (4.31)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання скошу пазів:

$$\lambda_{ck} = \frac{t_2 \beta_{ck2}^2}{9,5 \delta k_{\delta} k_{nac}}. \quad (4.32)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора:

$$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ck}. \quad (4.33)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, Ом:

$$X_2 = 7,9 f l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9}. \quad (4.34)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, Ом:

$$X'_2 = k_{np1} X_2. \quad (4.35)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, у відносних одиницях:

$$X_2'^* = X'_2 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}}. \quad (4.36)$$

Перевірка правильності визначення X'_2 :

$$\frac{X_1}{X'_2} \approx 0,7 \dots 1,0. \quad (4.37)$$

4.4 Параметри Г-подібної схеми заміщення

Для розрахунків використовується Г-подібна схема заміщення (рис. 4.3).

Перехід від Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна до Г-подібної (з винесеним на затискачі контуром намагнічування) передбачає перехід від опорів R_1 , X_1 , R'_2 , X'_2 (Т-подібної схеми) до опорів R'_1 , X'_1 , R''_2 , X''_2 (Г-подібної схеми).

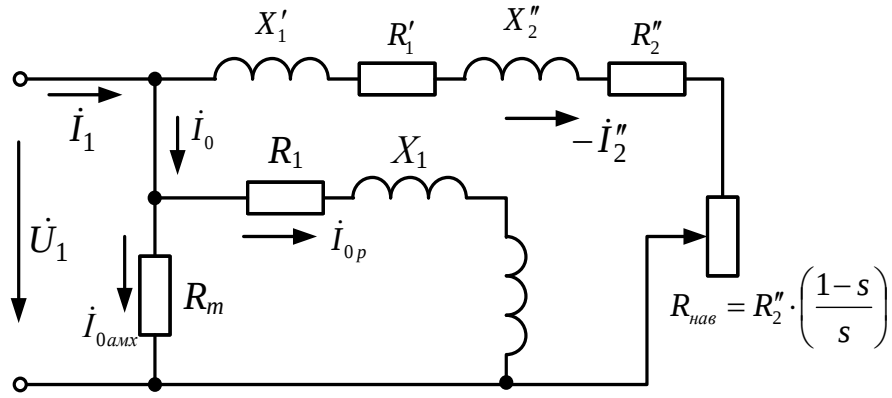


Рисунок 4.3 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Для робочих режимів активні опори обмоток потрібно перерахувати на стандартну робочу температуру обмоток, яка становить 75 °С для обмоток з ізоляцією класу В та 115 °С для обмоток з ізоляцією класів F і H.

Тоді поправковий коефіцієнт:

➤ для обмоток з ізоляцією класу В:

$$m_m = 1 + 0,004 \cdot (75 - 20) = 1,22;$$

➤ для обмоток з ізоляцією класів F і H:

$$m_m = 1 + 0,004 \cdot (115 - 20) = 1,38.$$

Коефіцієнт розсіювання статора:

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_m}. \quad (4.38)$$

Опори Г-подібної схеми заміщення, Ом:

$$\begin{cases} R_1' = m_m R_{1(20)}, \\ X_1' = X_1 \cdot (1 + \tau_1) \cdot \left(1 + \frac{R_{1(20)} \rho_1}{X_1}\right), \\ R_2'' = m_m R_{2(20)}' \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2), \\ X_2'' = X_2' \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2), \end{cases} \quad (4.39)$$

де ρ_1 – коефіцієнт опору статора:

$$\rho_1 = \frac{R_{1(20)} m_m}{X_1 + X_m}. \quad (4.40)$$

Якщо $\rho_1 \leq 1$, можна використовувати спрощені формули:

$$\begin{cases} R'_1 = m_m R_{1(20)}, \\ X'_1 = X_1 \cdot (1 + \tau_1), \\ R''_2 = m_m R'_{2(20)} \cdot (1 + \tau_1)^2, \\ X''_2 = X'_2 \cdot (1 + \tau_1)^2. \end{cases} \quad (4.41)$$

Значення коефіцієнта τ_1 дозволяє визначити необхідність повторного розрахунку магнітного кола. Це потрібно у випадку коефіцієнта насичення $k_{нас} \geq 1,7$ та $\tau_1 \geq 0,05$.

Тоді визначають ЕРС холостого ходу, B :

$$E_{10\partial n} = \frac{U_{1n}}{(1 + \tau_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}. \quad (4.42)$$

Якщо $E_{10\partial n}$, розраховане за (4.42), відрізняється від E_{10} , розрахованого за (3.24) більше, ніж на 3 %, то повторюють розрахунок магнітного кола за формулами (3.1) – (3.26) для магнітних індукцій B_δ , $B_{\delta 1}$, $B_{\delta 2}$ і B_{c2} , змінених пропорційно відношенню $E_{10\partial n} / E_{10}$.

Відповідно перераховуються і параметри перетвореної схеми заміщення.

5 РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДУ І НОМІНАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

5.1 Режим холостого ходу

Магнітні втрати в зубцях статора марки 2013 за умови $f_1 = 50$ Гц, Вт:

$$\Delta p_{m31} = 4,4 B_{31}^2 m_{31}, \quad (5.1)$$

де m_{31} – маса сталі зубців статора, кг. Для трапецеїдальних пазів:

$$m_{31} = 7,8 z_1 b_{31} h_{n1} l_1 k_c \cdot 10^{-6}. \quad (5.2)$$

Магнітні втрати в спинці статора марки 2013 за умови $f_1 = 50$ Гц, Вт:

$$\Delta p_{mc1} = 4,4 B_{c1}^2 m_{c1}, \quad (5.3)$$

де m_{c1} – маса сталі спинки статора, кг:

$$m_{c1} = 7,8 \pi \cdot (D_{n1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} l_1 k_c \cdot 10^{-6}. \quad (5.4)$$

Сумарні втрати в магнітопроводі статора з врахуванням додаткових втрат в сталі, Вт:

$$\Delta p_{m1} = \Delta p_{m31} \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{0,1 \cdot t_1 \cdot (k_\delta - 1)^2} \right) + \Delta p_{mc1}. \quad (5.5)$$

Механічні втрати, Вт:

➤ за ступеня захисту IP23 і способу охолодження IC01 без радіальних вентиляційних каналів:

$$\Delta p_{mx} = k_{mx} \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100} \right)^3, \quad (5.6)$$

де k_{mx} – коефіцієнт механічних втрат: $k_{mx} = 5,5$ за $2p = 2$; $k_{mx} = 6,5$ за $2p \geq 4$;

➤ за ступеня захисту IP23 і способу охолодження IC01 з радіальними вентиляційними каналами:

$$\Delta p_{mx} = (n_k + 11) \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100} \right)^3; \quad (5.7)$$

➤ за ступеня захисту IP44 і способу охолодження IC0141 без радіальних вентиляційних каналів:

$$\Delta p_{mx} = k_{mx} \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{H1}}{100} \right)^4, \quad (5.8)$$

де за умови $2p = 2$

$$k_{mx} = 1,3 \cdot \left(1 - \frac{D_{H1}}{1000} \right), \quad (5.9)$$

а за умови $2p \geq 4$ $k_{mx} = 1$.

Реактивна складова струму статора на холостому ході, А:

$$I_{0p} = \frac{U_{1H}}{X_m \cdot (1 + \tau_1) \cdot (1 + \rho_1^2)}. \quad (5.10)$$

Електричні втрати в обмотці статора, Вт:

$$\Delta p_{el10} = m_1 I_{0p}^2 R'_1 \cdot (1 + \rho_1^2). \quad (5.11)$$

Активна складова струму статора на холостому ході, А:

$$I_{0a} = \frac{\Delta p_{m1} + \Delta p_{mx} + \Delta p_{el10}}{m_1 U_{1H}}. \quad (5.12)$$

Струм холостого ходу, А:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (5.13)$$

Коефіцієнт потужності на холостому ході:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0}. \quad (5.14)$$

Опір кола намагнічування, Ом:

$$R_{\text{м}} = \frac{\Delta p_{\text{м1}}}{m_1 I_{0\text{ам}}^2}, \quad (5.15)$$

де $I_{0\text{ам}}$ – активна складова струму холостого ходу, обумовлена магнітними втратами, А:

$$I_{0\text{ам}} = \frac{\Delta p_{\text{м1}}}{m_1 U_{1\text{н}}}. \quad (5.16)$$

5.2 Режим номінального навантаження

Активний опір короткого замикання, Ом:

$$R_{\kappa} = R_1' + R_2''. \quad (5.17)$$

Індуктивний опір короткого замикання, Ом:

$$X_{\kappa} = X_1' + X_2''. \quad (5.18)$$

Повний опір короткого замикання, Ом:

$$Z_{\kappa} = \sqrt{R_{\kappa}^2 + X_{\kappa}^2}. \quad (5.19)$$

Додаткові втрати за номінального навантаження, Вт:

$$\Delta p_{\text{дн}} = \frac{0,005 P_2 \cdot 10^3}{\eta}. \quad (5.20)$$

Механічна потужність, Вт

$$P_{\text{мх.н}} = P_{2\text{н}} \cdot 10^3 + \Delta p_{\text{мх}} + \Delta p_{\text{дн}}. \quad (5.21)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення, Ом:

$$R_{\text{наб.н}} = \frac{m_1 U_{1\text{н}}^2}{2P_{\text{мх.н}}} - R_{\kappa} + \sqrt{\left(\frac{m_1 U_{1\text{н}}^2}{2P_{\text{мх.н}}} - R_{\kappa} \right)^2 - Z_{\kappa}^2}. \quad (5.22)$$

Повний опір схеми заміщення, Ом:

$$Z_{нав.н} = \sqrt{(R_{нав.н} + R_{\kappa})^2 + X_{\kappa}^2}. \quad (5.23)$$

Перевірка правильності розрахунку $R_{нав.н}$ і $Z_{нав.н}$:

$$\frac{R_{нав.н}}{Z_{нав.н}^2} = \frac{P_{мх.н.}}{m_1 U_{1\phi н}^2}. \quad (5.24)$$

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{1}{1 + \frac{R_{нав.н.}}{R_2''}}. \quad (5.25)$$

Активна складова струму статора за холостого ходу без врахування механічних втрат, А:

$$I_{0амх} = \frac{\Delta p_{ел10} + \Delta p_{м1}}{m_1 U_{1н}}. \quad (5.26)$$

Струм ротора, А:

$$I_{2н}'' = \frac{U_{1н}}{Z_{нав.н}}. \quad (5.27)$$

Активна складова струму статора, А:

$$I_{1ан} = I_{0амх} + I_{2н}'' \cdot \left(\frac{R_{нав.н} + R_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{X_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \quad (5.28)$$

Реактивна складова струму статора, А:

$$I_{1рн} = I_{0р} + I_{2н}'' \cdot \left(\frac{X_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{R_{нав.н} + R_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \quad (5.29)$$

Фазний струм статора, А:

$$I_{1н} = \sqrt{I_{1ан}^2 + I_{1рн}^2}. \quad (5.30)$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_{1н} = \frac{I_{1ан}}{I_{1н}}. \quad (5.31)$$

Електричні втрати в обмотці статора, Вт:

$$\Delta p_{ел1н} = m_1 I_{1н}^2 R'_1. \quad (5.32)$$

Електричні втрати в обмотці ротора, Вт:

$$\Delta p_{ел2н} = m_1 I_{2н}^2 R''_2. \quad (5.33)$$

Сумарні втрати, Вт:

$$\Delta p_{\Sigma н} = \Delta p_{ел1н} + \Delta p_{ел2н} + \Delta p_{м1} + \Delta p_{мх} + \Delta p_{дн}. \quad (5.34)$$

Потужність, що підводиться до двигуна, Вт:

$$P_{1н} = P_{2н} \cdot 10^3 + \Delta p_{\Sigma н}. \quad (5.35)$$

Коефіцієнт корисної дії, %:

$$\eta_n = \left(1 - \frac{\Delta p_{\Sigma н}}{P_{1н}} \right) \cdot 100. \quad (5.36)$$

Перевірка правильності розрахунків:

$$P_{1н} = m_1 U_{1фн} I_{1ан}. \quad (5.37)$$

Результати розрахунків за (5.35) і (5.37) мають збігатися.

Корисна потужність на валу, Вт:

$$P_{2н} = m_1 U_{1фн} I_{1н} \cos \varphi_{1н} \cdot \frac{\eta_n}{100}. \quad (5.38)$$

Значення P_{2H} , розраховане за (5.38), має відповідати заданому на початку проєктування.

Електромагнітна потужність, Вт:

$$P_{em.H} = P_{1H} - \Delta p_{el1H} - \Delta p_{M1}. \quad (5.39)$$

Перевірка правильності розрахунків:

$$\Delta p_{el2H} = s_H P_{em.H}. \quad (5.40)$$

Значення електричних втрат в обмотці ротора, розраховані за (5.40), мають збігатися зі значенням, розрахованим за (5.33).

Синхронна швидкість обертання, рад/с:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}. \quad (5.41)$$

Електромагнітний момент двигуна, Н·м:

$$M_H = \frac{P_{em.H}}{\omega_1}. \quad (5.42)$$

Частота обертання ротора, об/хв:

$$n_{2H} = (1 - s_H) \cdot n_1. \quad (5.43)$$

Швидкість обертання ротора, рад/с:

$$\omega_{2H} = \frac{2\pi n_{2H}}{60}. \quad (5.44)$$

Корисний момент на валу, Н·м:

$$M_{2H} = \frac{P_{2H}}{\omega_{2H}}. \quad (5.45)$$

Момент холостого ходу, Н·м:

$$M_0 = M_H - M_{2H}. \quad (5.46)$$

5.3 Розрахунок робочих характеристик

Розрахунок робочих характеристик виконується для діапазону зміни ковзання $s = (0,0001 \dots 1,2) \cdot s_n$. У цьому випадку спочатку розраховується

$$R_{нав} = \frac{1-s}{s} \cdot R_2'', \quad (5.47)$$

а потім розрахунок здійснюється за рівняннями (5.23), (5.27) – (5.34). В формулі (5.34) додаткові втрати визначаються як

$$\Delta p_o = k_{нав}^2 \cdot \Delta p_{он}, \quad (5.48)$$

де $k_{нав}$ – коефіцієнт навантаження двигуна:

$$k_{нав} = \frac{I_2''}{I_{2н}''}. \quad (5.49)$$

Після цього розраховується потужність, що підводиться до двигуна, за формулою (5.37), а корисна потужність – за формулою

$$P_2 = P_1 - \Delta p_{\Sigma} \quad (5.50)$$

та коефіцієнт корисної дії – за (5.36).

Подальший розрахунок здійснюється за (5.39) – (5.45).

За результатами розрахунків потрібно побудувати залежності $(I_1, P_1, \eta, \cos \varphi_1, n_2, s, M) = f(P_2)$. Для наочності рекомендується перевести осі характеристик у відносні одиниці.

6 РОЗРАХУНОК ПУСКОВОГО СТРУМУ, ПУСКОВОГО І МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТІВ

Пусковий струм асинхронного двигуна в 5...7 разів перевищує номінальний струм, що викликає збільшення потоків розсіювання, що супроводжується насиченням сталевих ділянок на шляху їх замикання. Це явище зменшує індуктивні опори розсіювання обмоток.

Крім того, в масивних стрижнях ротора під час пуску діє явище витіснення струму до зовнішньої поверхні ротора, за рахунок чого збільшується активний опір ротора.

Тому ці явища для пускових режимів потрібно враховувати.

6.1 Параметри обмоток ротора з врахуванням струму витіснення

Ступінь витіснення струму в стрижнях клітки ротора характеризується приведеною висотою стрижня:

$$\xi = 0,0735 h_{cm} \sqrt{\frac{s}{m_m}}, \quad (6.1)$$

під час пуску $s = 1$.

Висота стрижня, мм:

➤ за напівзакритих пазів:

$$h_{cm} = h_{n2} - h_{u2}; \quad (6.2)$$

➤ за закритих пазів:

$$h_{cm} = h_{n2} - h_{u2} - h_{m2}. \quad (6.3)$$

Активний опір стрижня клітки ротора з урахуванням витіснення струму в ньому, Ом:

$$R_{cm.\xi} = R_{cm} k_R, \quad (6.4)$$

де

$$k_R = 1 + \varphi. \quad (6.5)$$

Коефіцієнт φ визначають із залежності $\varphi = f(\xi)$ з рис. 6.1.

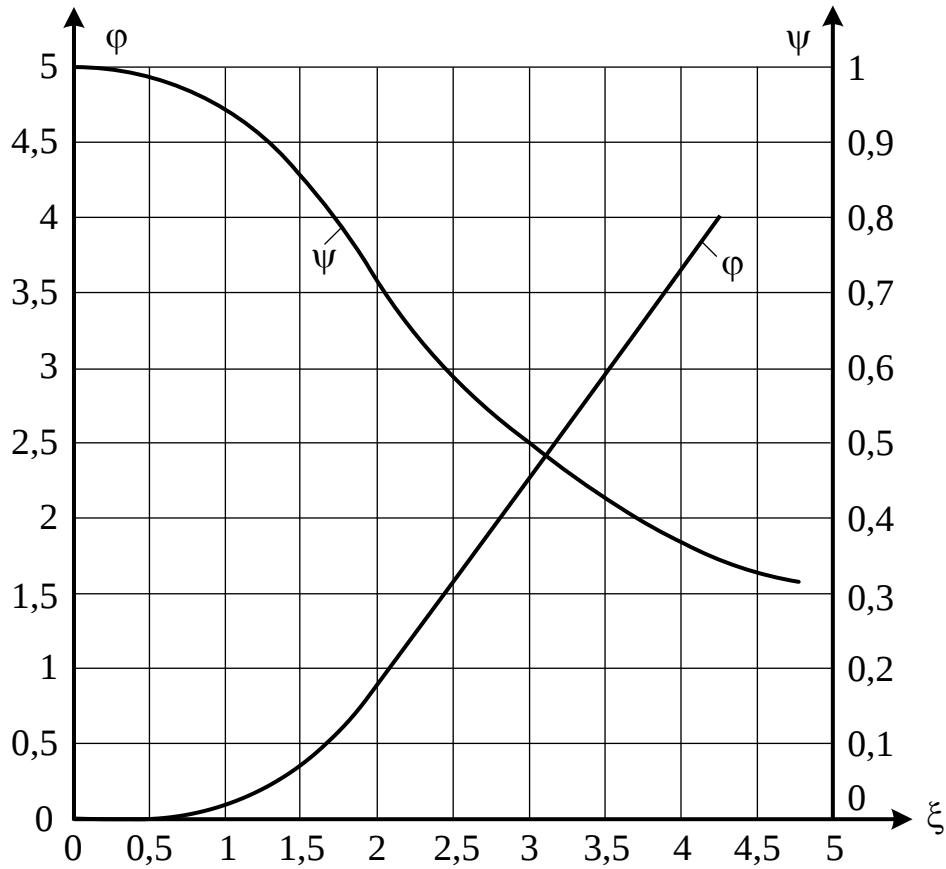


Рисунок 6.1 – Залежності $\varphi = f(\xi)$ та $\psi = f(\xi)$

Опір обмотки ротора для пускового режиму, Ом:

$$R_{2\xi} = R_{cm.\xi} + R_{кл.} \quad (6.6)$$

Опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, для пускового режиму за 20 °С, Ом:

$$R'_{2\xi(20)} = R_{2\xi} k_{np1}. \quad (6.7)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання паза ротора під час пуску:

➤ за напівзакритих пазів:

$$\lambda_{n2\xi} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} + \left[\frac{h_{y2} + 0,8r_2}{6r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{u2}}{4r_1} \right] \cdot \psi, \quad (6.8)$$

де ψ – коефіцієнт, який визначається з залежності $\psi = f(\xi)$ з рис. 6.1;

➤ за закритих пазів:

$$\lambda_{n2\xi} = 1,12 \cdot 10^3 \cdot \frac{h_{m2}}{I_{2H}} + 0,3 + \left[\frac{h_{y2} + 0,8r_2}{6r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{u2}}{4r_1} \right] \cdot \psi. \quad (6.9)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора під час пуску:

$$\lambda_{2\xi} = \lambda_{n2\xi} + \lambda_{\partial 2} + \lambda_{\kappa л} + \lambda_{\kappa к}. \quad (6.10)$$

Індуктивні опори ротора, Ом:

$$X_{2\xi} = X_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi}}{\lambda_2}, \quad (6.11)$$

$$X'_{2\xi} = X'_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi}}{\lambda_2}. \quad (6.12)$$

6.2 Параметри обмоток з урахуванням витіснення струму і насичення сталі зубців

Врахування струму витіснення враховано вище. Вплив насичення сталі зубців враховується наближено.

Попереднє значення струму короткого замикання з урахуванням насичення, А:

$$I_{\kappa H} = k_{нсп} I_{\kappa}, \quad (6.13)$$

де $k_{нсп}$ – коефіцієнт, що враховує насичення сталі зубців:

- за напівзакритих пазів статора і ротора $k_{нсп} = 1,3 \dots 1,4$;
- за закритих пазів статора і ротора $k_{нсп} = 1,3 \dots 1,45$.

$$I_{\kappa} \approx \frac{U_{1H}}{\sqrt{R_{\kappa \xi}^2 + X_{\kappa \xi}^2}}, \quad (6.14)$$

де

$$R_{\kappa\xi} = R_{1(20)}c_1 + R'_{2\xi(20)}c_1^2, \quad (6.15)$$

$$X_{\kappa\xi} = X_1c_1 + X'_{2\xi}c_1^2, \quad (6.16)$$

де

$$c_1 = 1 + \frac{X_1}{X_M}. \quad (6.17)$$

Кратність пускового струму:

$$k_{ni} = \frac{I_{\kappa}}{I_{1H}}. \quad (6.18)$$

Середнє значення МРС одного паза статора, А:

$$F_{ncp} = 0,7 \cdot \frac{I_{\kappa H} N_{n1\partial}}{a_1} \cdot \left(k_{\beta} + k_{y1} k_{об1} \cdot \frac{z_1}{z_2} \right), \quad (6.19)$$

де k_{β} – коефіцієнт, що враховує зменшення МРС внаслідок укорочення кроку (визначається з рис. 6.2 залежно від $\beta_{\partial} = y_{\partial} / \tau$).

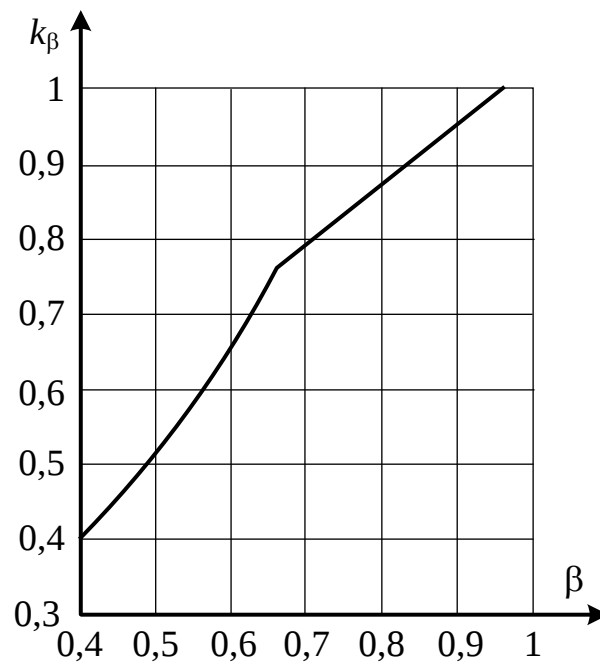


Рисунок 6.2 – Залежність $k_{\beta} = f(\beta)$

Фактична індукція в повітряному зазорі, Тл:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{ncp} \cdot 10^{-3}}{1,6\delta c_n}, \quad (6.20)$$

де

$$c_n = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}. \quad (6.21)$$

Зменшення коефіцієнта провідності пазового розсіювання через насичення для напівзакритого паза статора:

$$\Delta\lambda_{1H} = \frac{h_{u1} + 0,58h_{k1}}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{1H}}{c_{1H} + 1,5b_{u1}}, \quad (6.22)$$

де

$$c_{1H} = (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \chi_\delta), \quad (6.23)$$

де χ_δ – коефіцієнт, який визначається з рис. 6.3.

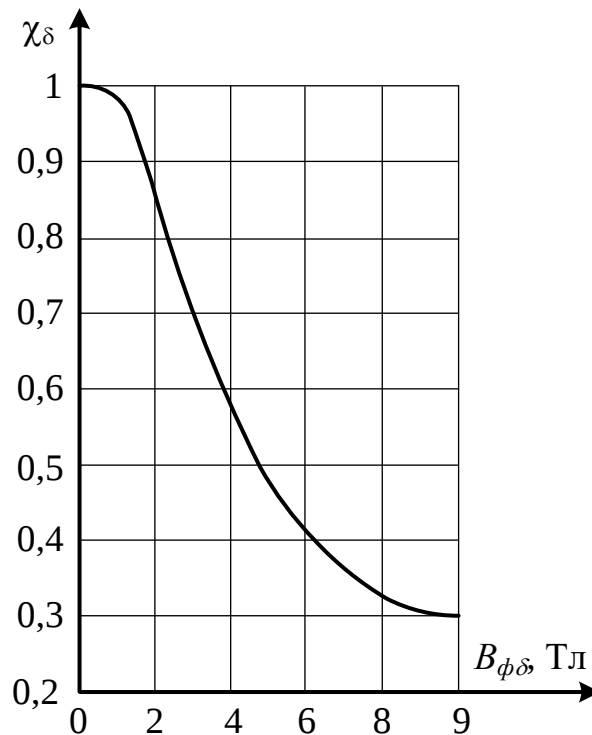


Рисунок 6.3 – Залежність $\chi_\delta = f(B_{\phi\delta})$

Коефіцієнт провідності пазового розсіювання з урахуванням насичення:

$$\lambda_{n1H} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{1H}. \quad (6.24)$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання статора:

$$\lambda_{\sigma 1H} = \lambda_{\sigma 1} \cdot \chi_{\delta}. \quad (6.25)$$

Коефіцієнт сумарної провідності статора та її індуктивний опір:

$$\lambda_{1H} = \lambda_{n1H} + \lambda_{\sigma 1H} + \lambda_{\lambda 1}, \quad (6.26)$$

$$X_{1H} = X_1 \cdot \frac{\lambda_{1H}}{\lambda_1}. \quad (6.27)$$

Зміна коефіцієнта провідності пазового розсіювання через насичення:

➤ за напівзакритого паза ротора:

$$\Delta\lambda_{n2H} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{2H}}{c_{2H} + b_{u2}}, \quad (6.28)$$

де

$$c_{2H} = (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \chi_{\delta}); \quad (6.29)$$

➤ за закритого паза ротора:

$$\Delta\lambda_{n2H} = 1,12 \cdot 10^3 \cdot h_{u2} \cdot \left(\frac{1}{I_{2H}} - \frac{1}{k_H k_{ni} I_{2H}} \right). \quad (6.30)$$

Коефіцієнт провідності пазового розсіювання ротора з врахуванням витіснення струму і насичення зубців:

$$\lambda_{n2\xi H} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2H}. \quad (6.31)$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання ротора:

$$\lambda_{\sigma 2H} = \lambda_{\sigma 2} \chi_{\delta}. \quad (6.32)$$

Коефіцієнт сумарної провідності ротора з урахуванням витіснення струму і насичення зубців:

$$\lambda_{2\xi_H} = \lambda_{n2\xi_H} + \lambda_{\partial 2H} + \lambda_{\kappa\lambda} + \lambda_{\kappa\sigma}. \quad (6.33)$$

Опори обмотки ротора, що відповідають провідності ротора з урахуванням витіснення струму і насичення зубців, Ом:

$$X_{2\xi_H} = X_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi_H}}{\lambda_2}, \quad (6.34)$$

$$X'_{2\xi_H} = X'_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi_H}}{\lambda_2}. \quad (6.35)$$

6.3 Пусковий струм і пусковий момент

Опори короткого замикання двигуна, Ом:

$$R_{\kappa\xi_H} = c_1 R_{1(20)} + c_1^2 R'_{2\xi(20)}, \quad (6.36)$$

$$X_{\kappa\xi_H} = c_1 X_{1H} + c_1^2 X'_{2\xi_H}, \quad (6.37)$$

$$Z_{\kappa\xi_H} = \sqrt{R_{\kappa\xi_H}^2 + X_{\kappa\xi_H}^2}. \quad (6.38)$$

Струм короткого замикання (пусковий струм) двигуна, А:

$$I_{\kappa} \approx I''_{2\kappa} = \frac{U_{1\phi_H}}{Z_{\kappa\xi_H}}, \quad (6.39)$$

значення якого не має відрізнятися від раніше розрахованого за (6.13) більше, ніж на 15 %. В іншому випадку розрахунок потрібно повторити, починаючи з (6.13) для значення струму $I_{\kappa H} = 0,5(I_{\kappa H} + I_{\kappa})$.

Кратність пускового струму:

$$k_{ni\partial} = \frac{I_n}{I_{1H}} = \frac{I_{\kappa}}{I_{1H}}. \quad (6.40)$$

Пусковий момент двигуна, Н·м:

$$M_n = \frac{pm_1 U_{1\phi n} c_1^2 R'_{2\xi(20)}}{2\pi f_1 Z_{\kappa\xi n}^2}. \quad (6.41)$$

Кратність пускового моменту:

$$k_{nm} = \frac{M_n}{M_{2n}}. \quad (6.42)$$

6.4 Максимальний момент

Критичне ковзання:

$$s_{kp} = \frac{R_2''}{\sqrt{R_1'^2 + X_{\kappa n}^2}}, \quad (6.43)$$

де $X_{\kappa n}$ – опір короткого замикання двигуна з урахуванням насичення зубців, Ом:

$$X_{\kappa n} = c_1 X_{1n} + c_1^2 X'_{2n}. \quad (6.44)$$

Ефект витіснення струму в цьому режимі не враховується, оскільки частота струму в роторі незначна.

Індуктивний опір обмотки ротора з врахуванням насичення зубців:

$$X'_{2n} = X'_2 \cdot \frac{\lambda_{2n}}{\lambda_2}, \quad (6.45)$$

де

$$\lambda_{2n} = \lambda_{n2n} + \lambda_{o2n} + \lambda_{\kappa l} + \lambda_{\kappa c}, \quad (6.46)$$

де

$$\lambda_{n2n} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2n}. \quad (6.47)$$

Максимальний момент, Н·м:

$$M_{max} = \frac{pm_1 U_{1н}^2 \cdot \frac{R_2''}{s_{kp}}}{2\pi f_1 \cdot \left[\left(R_1' + \frac{R_2''}{s_{kp}} \right)^2 + X_{кн}^2 \right]}. \quad (6.48)$$

Кратність максимального моменту:

$$k_m = \frac{M_{max}}{M_{2н}}. \quad (6.49)$$

7 ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ

7.1 Тепловий розрахунок

Припущення:

1) втрати в обмотках і втрати в сталі магнітопроводів статора і ротора створюють однаковий ефект нагрівання;

2) втрати в активній частині магнітопроводу відводяться його циліндричною поверхнею, а втрати в лобових частинах обмоток – циліндричною поверхнею цих частин обмоток.

Втрати в обмотці статора за максимально допустимої температури, Вт:

$$\Delta p_{el1n.m} = m_1 I_{1n}^2 m'_m R'_1, \quad (7.1)$$

де m'_m – коефіцієнт, який залежить від класу ізоляції обмотки:

- для ізоляції класу В – $m'_m = 1,4$;
- для ізоляції класу F – $m'_m = 1,48$.
- для ізоляції класу Н – $m'_m = 1,58$.

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора, мм²:

$$S_{c1} = \pi D_1 l_1. \quad (7.2)$$

Умовний периметр поперечного перерізу трапецеїдального напівзакритого паза, мм:

$$\Pi_1 = 2h_{n1} + b_1 + b_2. \quad (7.3)$$

Умовна поверхня охолодження, мм²:

- пазів статора:

$$S_{in1} = z_1 \Pi_1 l_1; \quad (7.4)$$

- лобових частин обмотки:

$$S_{л1} = 4\pi D_1 l_{с1}; \quad (7.5)$$

- двигуна без ребер охолодження на станині (IP23):

$$S_{\partial\sigma} = \pi D_{н1} \cdot (l_1 + 2l_{\sigma 1}); \quad (7.6)$$

➤ двигуна з ребрами охолодження на станині (IP44):

$$S_{\partial\sigma.p} = (\pi D_{н1} + 8n_p h_p) \cdot (l_1 + 2l_{\sigma 1}), \quad (7.7)$$

де n_p – кількість ребер зовнішньої поверхні корпусу:

$$n_p \approx 1,6 \cdot \sqrt[3]{h}; \quad (7.8)$$

h_p – висота ребер зовнішньої поверхні корпусу:

$$h_p \approx 0,6 \cdot \sqrt[4]{h^3}. \quad (7.9)$$

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки і від втрат в сталі, віднесених до внутрішньої поверхні охолодження активної частини статора, Вт/мм²:

$$P_{c1} = k \cdot \frac{\Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \Delta p_{м1}}{S_{c1}}, \quad (7.10)$$

де k – коефіцієнт, що враховує частину втрат в активній частині статора, яка нагріває повітря всередині двигуна, значення якого вибирається з табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Значення коефіцієнта k

$2p$	Коефіцієнт k для двигунів зі ступенем захисту	
	IP44	IP23
2; 4	0,2...0,22	0,8...0,84
6; 8	0,18...0,19	0,76...0,78
10; 12	0,16...0,17	0,72...0,74

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки, віднесених до поверхні охолодження пазів, Вт/мм²:

$$P_{in1} = \frac{\Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}}}{S_{in1}}. \quad (7.11)$$

Питомий тепловий потік від втрат в лобових частинах обмотки, віднесених до поверхні охолодження цих частин, Вт/мм²:

$$P_{л1} = \frac{\Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}}}{S_{л1}}. \quad (7.12)$$

Кругова швидкість ротора, м/с:

$$\vartheta_2 = \frac{\pi D_{н2} n_1}{60\,000}. \quad (7.13)$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні активної частини статора над температурою повітря всередині двигуна, °С:

$$\Delta t_{n1} = \frac{P_{c1}}{\alpha_1}, \quad (7.14)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі поверхні статора, Вт/(мм²·град), значення якого вибирається з рис. 7.1.

Перепад температури в ізоляції паза і котушок з круглих проводів, °С:

$$\Delta t_{in1} = P_{in1} \cdot \left(\frac{b_{i1}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{екв}} \right), \quad (7.15)$$

де $\lambda_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції в пазу з урахуванням повітряних шарів, $\lambda_{екв} = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·град);

$\lambda'_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки, що залежить від відношення діаметрів голого та ізольованого проводу d / d' . Визначається з рис. 7.2.

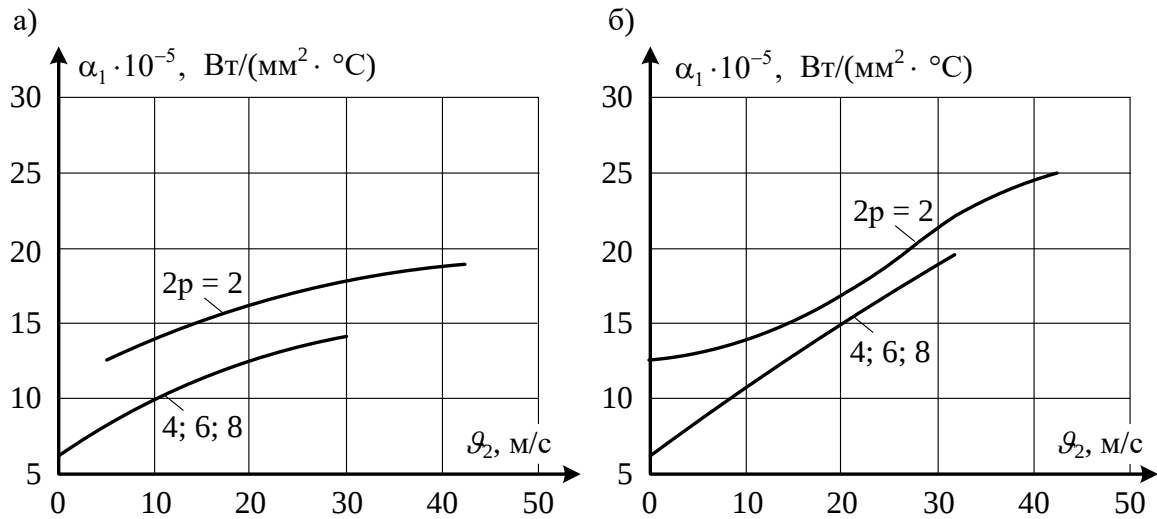


Рисунок 7.1 – Значення $\alpha_1 = f(g_2)$:

- а) виконання із захистом IP44, спосіб охолодження IC0141;
б) виконання із захистом IP23, спосіб охолодження IC01

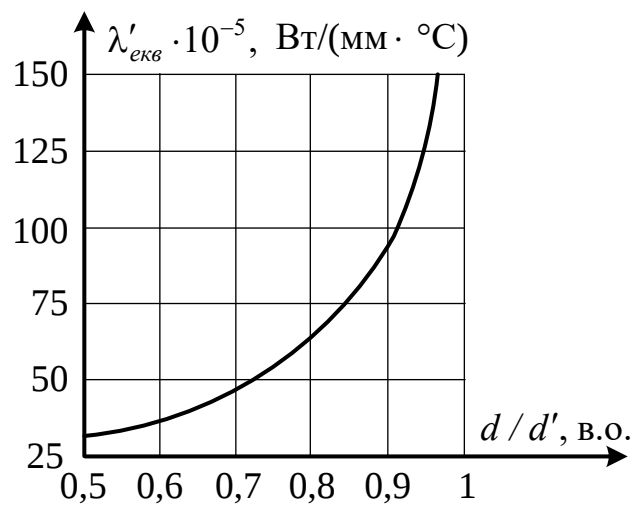


Рисунок 7.2 – Залежність $\lambda'_{\text{екв}} = f(d/d')$

Перепад температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки над температурою повітря всередині двигуна, $^\circ\text{C}$:

$$\Delta t_{л1} = \frac{P_{л1}}{\alpha_1}. \quad (7.16)$$

Перепад температури в ізоляції лобових частинах котушок з круглих провідників, град:

$$\Delta t_{in1} = P_{л1} \cdot \left(\frac{b_{in1}}{\lambda_{екв}} + \frac{h_{n1}}{12\lambda'_{екв}} \right), \quad (7.17)$$

де b_{in1} – одностороння товщина ізоляції котушок в лобовій частині, беремо $b_{in1} = b_{i1}$.

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря всередині двигуна, °C:

$$\Delta t'_1 = (\Delta t_{n1} + \Delta t_{in1}) \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + (\Delta t_{л1} + \Delta t_{in1}) \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}}. \quad (7.18)$$

Втрати в двигуні, що передаються повітряу всередині двигуна, Вт:

➤ зі ступенем захисту IP23:

$$\begin{aligned} \Delta p'_\Sigma = k \cdot \left(\Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \Delta p_{м1} \right) + \Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \\ + \Delta p_{ел2н.м} + \Delta p_{мх} + \Delta p_{дн}; \end{aligned} \quad (7.19)$$

➤ зі ступенем захисту IP44:

$$\begin{aligned} \Delta p'_\Sigma = k \cdot \left(\Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \Delta p_{м1} \right) + \Delta p_{ел1н.м} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \\ + \Delta p_{ел2н.м} + 0,1\Delta p_{мх} + \Delta p_{дн}, \end{aligned} \quad (7.20)$$

де

$$\Delta p_{ел2н.м} = m_1 I_{2н}''^2 R_{2м}'', \quad (7.21)$$

$$R_{2м}'' = m_m' R_{2(20)}'', \quad (7.22)$$

$$R_{2(20)}'' = c_1^2 R_{2(20)}'. \quad (7.23)$$

Середнє перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою зовнішнього повітря, °C:

- без ребер охолодження на корпусі:

$$\Delta t_{\epsilon} = \frac{\Delta p'_{\Sigma}}{S_{\partial\epsilon} \alpha_{\epsilon}}; \quad (7.24)$$

- з ребрами охолодження на корпусі:

$$\Delta t_{\epsilon} = \frac{\Delta p'_{\Sigma}}{S_{\partial\epsilon.p} \alpha_{\epsilon}}, \quad (7.25)$$

де α_{ϵ} – коефіцієнт підігріву повітря, значення якого вибирається з рис. 7.3.

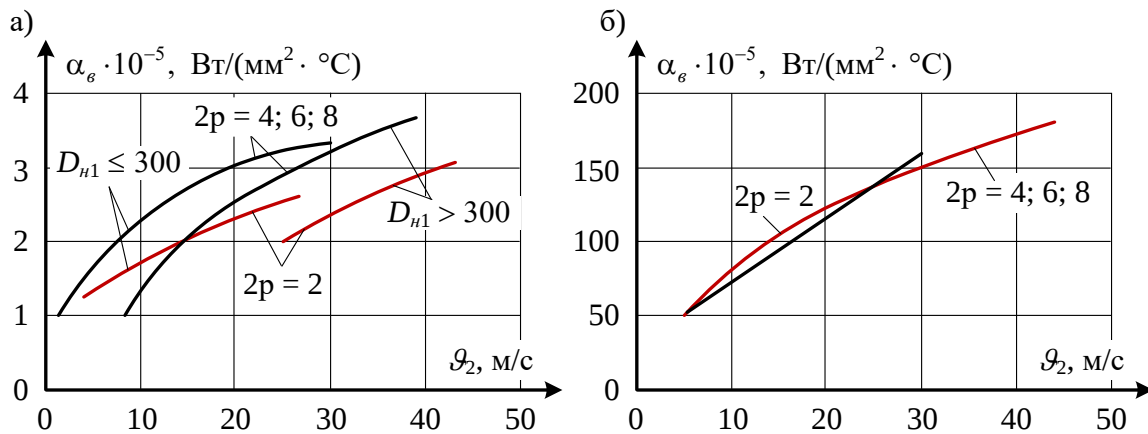


Рисунок 7.3 – Залежність $\alpha_{\epsilon} = f(G_2)$:

- а) виконання із захистом IP44, спосіб охолодження IC0141;
- б) виконання із захистом IP23, спосіб охолодження IC01

Середнє перевищення температури обмоток над температурою навколишнього повітря, °C:

$$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_{\epsilon}. \quad (7.26)$$

Це перевищення не має бути більшим гранично допустимого значення:

- 80 °C для ізоляції класу B;
- 100 °C для ізоляції класу F;
- 125 °C для ізоляції класу H.

7.2 Вентиляційний розрахунок

В машинах зі ступенем захисту IP23 і способом охолодження IC01 застосовується радіальна система вентиляції, за якої повітря ззовні зтягується через торцеві вікна обох підшипникових щитів, відкидається в радіальному напрямку, охолоджуючи активні частини машини, і викидається через бокові вікна корпусу. Затягування повітря в двигун відбувається за допомогою лопаток ротора, а також його радіальних вентиляційних каналів (при $l > 300$ мм).

В машин зі ступенем захисту IP44 і способом охолодження IC0141 зовнішня поверхня корпусу обдувається вентилятором, розміщеним на кінці вала машини, протилежному до того, що виступає. Вентилятор закритий кожухом, який направляє повітря вздовж ребер корпусу.

7.2.1 Двигуни зі ступенем захисту IP23 і способом охолодження IC01

Необхідний розхід повітря, м³/с:

$$V'_e = \frac{\Delta p'_\Sigma}{c_e \Delta t'_e}, \quad (7.27)$$

де c_e – теплоємність машини, $c_e = 1100$ Дж/(°С·м³);

$\Delta t'_e$ – перевищення температури повітря, що виходить з двигуна, над повітрям, що в нього входить, °С:

$$\Delta t'_e = 2\Delta t_e. \quad (7.28)$$

Коефіцієнт, що залежить від частоти обертання n_1 :

$$k_1 = 3,5 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n_1}{1000}\right)^3} \cdot \frac{n_k l_k + 100}{100}. \quad (7.29)$$

Розхід повітря, який може бути забезпечений радіальною системою вентиляції, м³/с:

$$V'_e \approx k_1 \cdot \left(\frac{D_{н2}}{100}\right)^2 \cdot 10^{-2}. \quad (7.30)$$

Напір повітря, що розвивається за умови радіальної вентиляції, Па:

$$H \approx 7,85 \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{н2}}{100} \right)^2. \quad (7.31)$$

7.2.2 Двигуни зі ступенем захисту IP44 і способом охолодження IC0141

Зовнішній діаметр корпусу, мм:

$$D_{корп} = 2 \cdot (h - h_1). \quad (7.32)$$

Коефіцієнт, що враховує зміну тепловіддачі по довжині корпусу двигуна:

$$k_{2\theta} = 2,2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n_1}{1000} \right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{корп}}{100}}. \quad (7.33)$$

Необхідна витрата повітря, м³/с:

$$V_{\theta} = k_{2\theta} \cdot \frac{\Delta p'_{\Sigma}}{c_{\theta} \Delta t_{\theta}}. \quad (7.34)$$

Витрата повітря, яка може бути забезпечена зовнішнім вентилятором, м³/с:

$$V'_{\theta} \approx 0,6 \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right) \cdot \left(\frac{D_{корп}}{100} \right)^3 \cdot 10^{-2}. \quad (7.35)$$

Напір повітря, що розвивається зовнішнім вентилятором, Па:

$$H \approx 12,3 \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{корп}}{100} \right)^2. \quad (7.36)$$

Внаслідок розрахунку має виконуватися умова $V'_{\theta} > V_{\theta}$. Якщо умова не виконується, то потрібно змінити елементи конструкції двигуна з метою збільшення V'_{θ} до відповідного значення.

8 МАСА ДВИГУНА ТА ДИНАМІЧНИЙ МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ

Наближене значення динамічного моменту інерції, кг·м²:

$$J_{i\partial} = (0,55 \dots 0,65) \cdot D_{n2}^4 l_2 \cdot 10^{-12}. \quad (8.1)$$

Маса ізольованих проводів обмотки статора за умови круглого поперечного перерізу, кг:

$$m_{m1} = \left[7,55 + 1,35 \cdot \left(\frac{d'}{d} \right)^2 \right] \cdot z_1 \cdot \frac{N_{n1\partial}}{2} \cdot l_{cp1} \cdot c \cdot S \cdot 10^{-6}, \quad (8.2)$$

де S' – середня ширина паза, мм:

$$S' = (a + \Delta_i) \cdot (b + \Delta_i). \quad (8.3)$$

Маса алюмінію короткозамкненого ротора, кг:

$$m_{al2} = 2,7 \cdot \left[z_2 S_{cm} l_2 + 2\pi D_{клр} S_{кл} + 1,1 N_{л} \cdot (l_{л} - l_{кл}) \cdot h_{л} b_{л} \right] \cdot 10^{-6}, \quad (8.4)$$

де $N_{л}$ – кількість лопаток вентилятора, вибирається з табл. 8.1;

$b_{л}$ – товщина лопаток вентилятора, мм:

$$b_{л} \approx 0,3 \sqrt{h}; \quad (8.5)$$

$h_{л}$ – висота лопаток вентилятора, мм:

$$h_{л} \approx 0,83 \cdot \sqrt[3]{h^2}; \quad (8.6)$$

$l_{л}$ – довжина лопаток вентилятора, мм:

$$l_{л} \approx 0,31 h. \quad (8.7)$$

Таблиця 8.1 – Вибір кількості лопаток вентилятора $N_{л}$

h , мм	50...100	112...250	280...355
N	6...9	10...14	17...22

Маса сталі магнітопроводів статора і ротора, кг:

$$m_{c\Sigma} = 7,8l_1k_c \cdot (0,785 \cdot (D_{n1}^2 - D_2^2) - z_1S_{n1} - z_2S_{n2}) \cdot 10^{-6}. \quad (8.8)$$

Маса ізоляції статора за трапецеїдальних напівзакритих пазів, кг:

$$m_{i1} = 1,35 \cdot (l_1 + 20) \cdot (2h_{n1} + 3b_n) \cdot b_{i1}z_1 \cdot 10^{-6}, \quad (8.9)$$

де b_n – середня довжина паза, мм:

$$b_n = 0,5 \cdot (b_1 + b_2). \quad (8.10)$$

Маса конструктивних матеріалів двигуна зі ступенем захисту IP44, кг:

➤ за умови $h \leq 200$ мм, станина і щити з алюмінієвого сплаву, ротор короткозамкнений:

$$m_k = [(0,21 \dots 0,28)D_{n1}^2l_1 + (2,2 \dots 3)D_{n1}^3] \cdot 10^{-6}; \quad (8.11)$$

➤ за умови $h \leq 400$ мм, станина і щити чавунні, ротор короткозамкнений:

$$m_k = [(0,55 \dots 0,75)D_{n1}^2l_1 + (2,3 \dots 3,1)D_{n1}^3] \cdot 10^{-6}. \quad (8.12)$$

Верхня межа коефіцієнтів відноситься до більшого значення h .

Маса конструктивних матеріалів двигуна зі ступенем захисту IP23, кг:

➤ за умови $h \leq 250$ мм, станина і щити чавунні, ротор короткозамкнений:

$$m_k = [(0,9 \dots 1,2)D_{n1}^2l_1 + (1,8 \dots 2,5)D_{n1}^3] \cdot 10^{-6}; \quad (8.13)$$

➤ за умови $h \leq 355$ мм, зварне виконання, ротор короткозамкнений:

$$m_k = (0,9 \dots 1,2)D_{n1}^2l_1 \cdot 10^{-3} + (10 \dots 15)D_{n1}^{1,6} \cdot 10^{-3}. \quad (8.14)$$

Маса двигуна з короткозамкненим ротором:

$$m_{\partial s} = m_{m1} + m_{al2} + m_{c\Sigma} + m_{i1} + m_k. \quad (8.15)$$

9 КОНСТРУКЦІЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

В асинхронних двигунах потужністю до 20 кВт включно застосовується лише виконання IP44 зі способом охолодження IC0141. Приклад такої конструкції приведений на рис. 9.1.

В двигунах більшої потужності поряд з цим виконанням також застосовується виконання IP23. Приклад такої конструкції наведено на рис. 9.2.

На рис. 9.1 та рис. 9.2:

- 1 – вал;
- 2 – кришка підшипникова зовнішня;
- 3 – кришка підшипникова внутрішня;
- 4 – щит підшипниковий передній;
- 5 – коробка виводів;
- 6 – рем-гвинт;
- 7 – магнітопровід статора;
- 8 – магнітопровід ротора;
- 9 – обмотка статора;
- 10 – обмотка ротора;
- 11 – щит підшипниковий задній;
- 12 – вентилятор;
- 13 – кожух;
- 14 – гвинт заземлення.

Розробку конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором за даними електромагнітного розрахунку потрібно починати зі статора, оскільки довжина всього двигуна визначається довжиною магнітопроводу статора l_1 та довжиною вильоту лобових частин обмотки статора l_{e1} .

Ширина двигуна визначається зовнішнім діаметром магнітопроводу статора D_{H1} .

Потрібно, щоб спроектований двигун мав стандартні габаритні, установочні і приєднувальні розміри, значення яких наведено в табл. 9.1 (виконання IP44) і табл. 9.2 (виконання IP23).

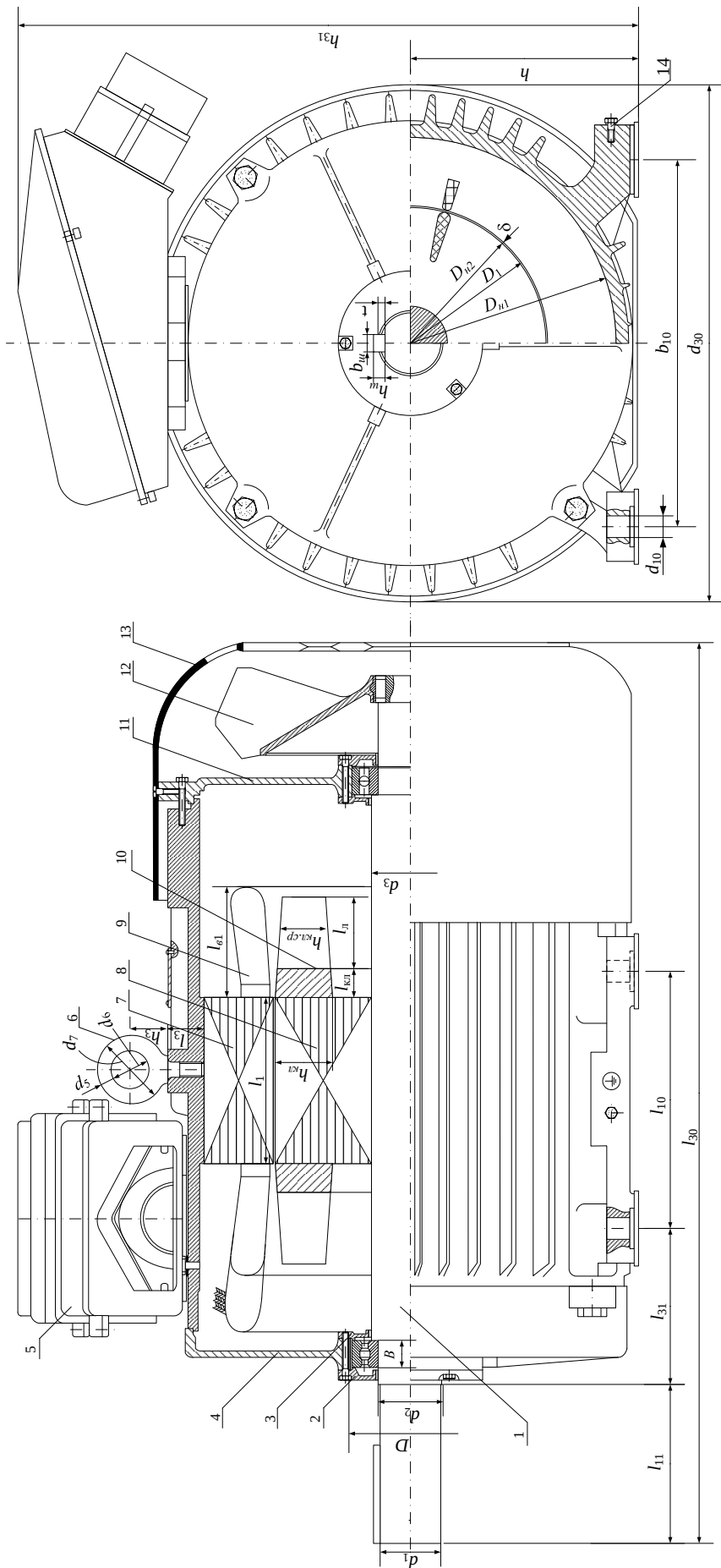


Рисунок 9.1 – Асинхронний двигун зі ступенем захисту IP44 зі способом охолодження IC0141

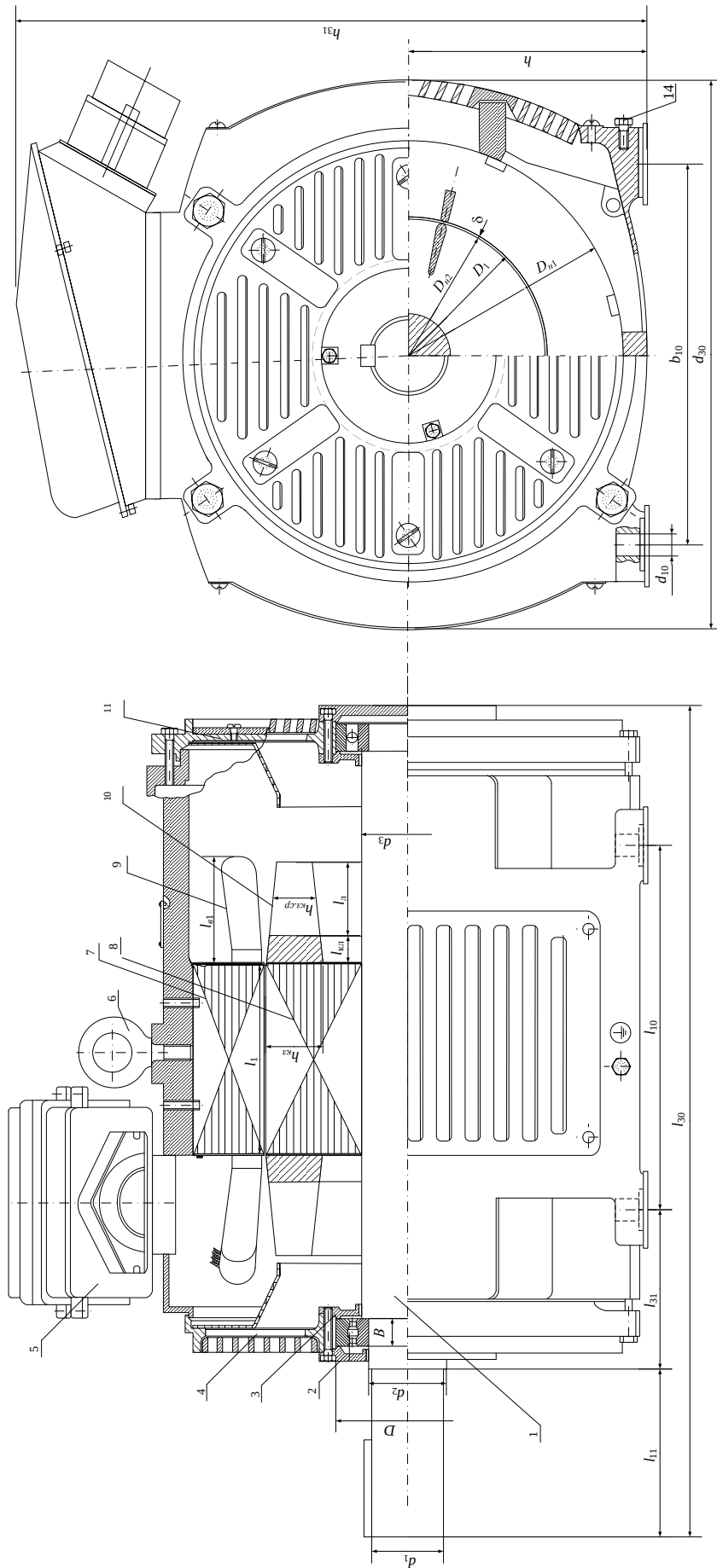


Рисунок 9.2 – Асинхронний двигун зі ступенем захисту IP23 зі способом охолодження IC01

Таблиця 9.1 – Розміри для двигуна з виконанням IP44

Висота осі обертання, умовна довжина станини	2 <i>p</i>	Установочні і приєднувальні розміри, мм							Габарити, мм			Маса, кг
		<i>h</i>	<i>l</i> ₁₁	<i>l</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₁	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₁₀	<i>b</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₀	<i>h</i> ₃₁	<i>d</i> ₃₀	
100S	2; 4	100	60	112	63	28	12	160	365	265	235	37
100L	2; 4;			140					395	280		42
112M	6; 8	112	80		70	32	12	190	452	310	260	58
160S	2	160	110	178	108	42	15	254	624	430	358	130
	4; 6; 8					48						135
160M	2			210		42			667			145
	4; 6; 8					48			160			
180S	2	180	110	203	121	48	15	279	662	470	410	170
	4					55						180
180M	2			241		48			702			190
	4; 6; 8					55			200			
200M	2	200	110	267	133	60	19	318	760	535	450	260
	4; 6; 8		140						790			275
200L	2		110	305		55			800			285
	4; 6; 8		140			60			830			315
225M	2	225	110	311	140	55	19	356	810	575	494	360
	4; 6; 8		140			65			840			340
250S	2	250	140	311	168	65	24	406	915	640	554	485
	4; 6; 8; 10					75						505
250M	2			349		65			955			525
	4; 6; 8					75			550			

Таблиця 9.2 – Розміри для двигуна з виконанням IP23

Висота осі обертання, умовна довжина станини	2 <i>p</i>	Установочні і приєднувальні розміри, мм							Габарити, мм			Маса, кг
		<i>h</i>	<i>l</i> ₁₁	<i>l</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₁	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₁₀	<i>b</i> ₁₀	<i>l</i> ₃₀	<i>h</i> ₃₁	<i>d</i> ₃₀	
160S	2	160	110	178	108	42	15	254	533	430	332	110
	4			48		115						
160M	2			210		42			130			
	4			48		135						
180S	2	180	110	203	121	48	15	279	580	695	385	170
	4; 6; 8			55		185						
180M	2			241		48			190			
	4; 6; 8			55		190						
200M	2	200	110	267	133	55	19	318	665	535	460	265
	4; 6; 8		140			60			695			260
200L	2		110	305		55			705			295
	4; 6; 8		140			60			735			315
225M	2	225	110	311	149	55	19	356	715	580	500	355
	4; 6; 8		140			60			745			
250S	2	250	140	311	168	65	24	406	805	640	550	465
	4; 6; 8			75		445						
250M	2			349		65			505			
	4; 6; 8			75		495						

Розміри шпонки на вихідному кінці вала залежать від його діаметра та довжини. Ці розміри наведено в табл. 9.3.

Таблиця 9.3 – Розміри шпонки

Розміри шпонки, мм				
d_1	l_{11}	$b_{ш}$	$h_{ш}$	t
32	80	10	8	5
42	110	12	8	5
48	110	14	9	5,5
55	110	16	10	6
60	140	18	11	7
65	140	18	11	7
70	140	20	12	7,5
75	140	20	12	7,5
80	170	22	14	9

Для забезпечення необхідної жорсткості в усіх перерізах вала його діаметри під підшипник d_2 і за підшипником d_3 мають відповідати значенням, наведеним в табл. 9.4.

Таблиця 9.4 – Діаметри вала

d_1 , мм	28	32	38	42	48	55	60	65	70	75
d_2 , мм	30	35	40	45	50	60	65	70	75	80
d_3 , мм	37	44	49	54	60	72	77	82	87	92

Основні розміри рем-гвинтів наведено в табл. 9.5.

Таблиця 9.5 – Параметри рем-гвинтів

d_4	d_5	d_6	d_7	h_3	l_3	$m_{де}$
мм						кг
M8	8	20	36	18	18	120
M10	10	25	45	24	21	200
M12	12	30	54	28	25	300
M16	14	35	63	32	32	550

Габаритні і установочні розміри підшипників наведено в табл. 9.6.

Таблиця 9.6 – Габаритні і установочні розміри підшипників

d_2 , мм	30	35	40	45	50	60	65	70	75	80
D , мм	62	72	80	85	90	110	120	125	130	140
B , мм	16	17	18	19	20	22	23	24	25	26

Зовнішній діаметр вентилятора, мм:

$$D_{\text{вент}} \approx 0,85D_{\text{корп.}} \quad (9.1)$$

Ширина лопатки вентилятора (довжина в осьовому напрямку машини), мм:

$$l_{\text{л}} \approx 0,2D_{\text{корп.}} \quad (9.2)$$

10 КУРСОВЕ ПРОЄКТУВАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

10.1 Загальні вимоги до курсового проєкту

Виконання курсового проєкту з обов'язкової професійної навчальної дисципліни «Електричні машини» передбачено навчальним планом спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Згідно з нормативними вимогами вищої школи та інших актів законодавства України з питань освіти курсові проєкти з дисципліни виконуються з метою закріплення, поглиблення та узагальнення знань, одержаних студентами за час навчання.

10.2 Вимоги до оформлення курсового проєкту

ДСТУ 3008:2015 регламентує вимоги до оформлення пояснювальної записки курсового проєкту, яких потрібно дотримуватись. Текст пояснювальної записки має бути набраний на комп'ютері та роздрукований на принтері.

Шрифт і відступи. Текст пояснювальної записки має бути набраний у будь-якому текстовому редакторі шрифтом Times New Roman, кегль 14 з міжрядковим інтервалом 1,5. Пояснювальна записка курсового проєкту має подаватись на аркушах паперу формату А4 за формами 2, 2а (ДСТУ ГОСТ 2.104:2006). На всіх аркушах форми 2а, окрім номера сторінки пояснювальної записки проєкту необхідно вказувати цифровий код проєкту. Допускається оформлення пояснювальної записки курсового проєкту за вимогами ЄСКД.

Оформлення розділів і підрозділів. Структурними елементами основної частини дослідження є розділи та підрозділи.

Розділ – головний ступінь поділу тексту, позначений номером та має заголовок. Підрозділ – частина розділу, яка позначена номером та має заголовок. Заголовки структурних елементів необхідно нумерувати, використовуючи лише арабські цифри.

Заголовок розділу записують по центру сторінки (ДСТУ 3008:2015) великими літерами з більш високою насиченістю. Заголовки підрозділів записують з абзацу малими літерами, починаючи з великої, без крапки вкінці. Перед заголовком і після нього пропускають один рядок.

Розділи нумерують порядковими номерами в межах всього документа (1, 2 і т. д.). Підрозділи та пункти нумерують в межах кожного розділу за формою (3.1, 3.2, 3.2.1, 3.2.2, 3.2.2.1 і т. д.).

Цифри, які вказують номер, не мають виступати за абзац. Після номера крапку не ставлять, а пропускають один знак.

Допускається розміщувати текст між заголовками розділу і підрозділу. Посилання в тексті на розділи виконується за формою: «...наведено в розділі 3».

Оформлення таблиць. Таблицю розміщують симетрично до тексту після першого посилання на цій самій сторінці або на наступній, якщо на цій вона не вміщується, і таким чином, щоб зручно було її розглядати без повороту або з поворотом на кут 90°. Таблиці у тексті пояснювальної записки набираються основним шрифтом, в деяких випадках кегль може бути зменшений до 10–12. Назва таблиці має відображати її зміст, бути конкретною та стислою. Назву таблиці друкують з абзацу, вказавши її номер, з великої літери і розміщують над таблицею.

На всі таблиці мають бути посилання за формою « ... в табл. 1.1» або в дужках по тексту «(табл. 1.1)». Посилання на раніше наведену таблицю дають зі скороченим словом «дивись» «(див. табл. 1.1)» за ходом чи в кінці речення.

Під час перенесення частин таблиці на інші сторінки повторюють або продовжують найменування граф. Допускається виконувати нумерацію граф на початку таблиці і у разі перенесення частин таблиці на наступні сторінки повторювати тільки нумерацію граф. У всіх випадках найменування (за його наявності) таблиці розміщують тільки над першою частиною, а над іншими частинами зліва пишуть «Продовження таблиці 1» без крапки в кінці.

Оформлення рисунків. Розміщують рисунки в тексті або в додатках. В тексті ілюстрацію розміщують симетрично до тексту після першого посилання на неї або на наступній сторінці, якщо на цій вона не вміщується без повороту. На всі рисунки мають бути посилання за формою: «... на рис. 1.5», або в дужках по тексту «(рис. 1.6)». Посилання на раніше наведений рисунок дають зі скороченим словом «дивись» «(див. рис. 4)» за ходом чи в кінці речення. Кожен рисунок має мати номер і підпис, розташовані під рисунком по центру. Крапку в кінці не ставлять, знак переносу не використовують. Якщо найменування рисунка довге, то його продовжують у наступному рядку, починаючи від найменування.

Між ілюстрацією і текстом пропускають один рядок. Нумерують ілюстрації в межах розділів, вказуючи номер розділу і порядковий номер ілюстрації в розділі, розділяючи крапкою. Дозволяється нумерувати рисунки в межах всього документа.

Формули. Кожну формулу записують з нового рядка, симетрично до тексту. Між формулою і текстом пропускають один рядок.

Пояснення позначень, які входять до формули, наводять в тексті або зразу ж під формулою. Для цього після формули ставлять кому і записують пояснення до кожного символу з нового рядка в тій послідовності, в якій вони наведені у формулі, розділяючи крапкою з комою. Перший рядок має починатися зі слова «де» без двокрапки. Всі формули нумерують в межах розділу арабськими цифрами. Номер вказують в круглих дужках з правої сторони, в кінці рядка, на рівні закінчення формули. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, розділених крапкою. Дозволяється виконувати нумерацію в межах всього документа.

Формула є частиною речення, тому до неї застосовують такі самі правила пунктуації, як і до інших членів речення. Якщо формула знаходиться в кінці речення, то після неї ставлять крапку. Формули, які йдуть одна за одною і не розділені текстом, відокремлюють комою.

10.3 Зміст і структура пояснювальної записки

Зміст курсового проєкту:

- 1 Визначення головних розмірів двигуна
- 2 Розрахунок обмоток
 - 2.1 Обмотка статора
 - 2.2 Обмотка короткозамкненого ротора
- 3 Розрахунок магнітного кола
 - 3.1 Розрахунок МРС ділянок магнітного кола
 - 3.1.1 МРС повітряного зазору
 - 3.1.2 МРС зубців статора
 - 3.1.3 МРС зубців ротора
 - 3.1.4 МРС спинки статора
 - 3.1.5 МРС спинки ротора
 - 3.1.6 Параметри магнітного кола
- 4 Активні та індуктивні опори обмоток
 - 4.1 Опір обмотки статора

- 4.2 Опір обмотки ротора
- 4.3 Параметри Г-подібної схеми заміщення
- 5 Режим холостого ходу і номінального навантаження
 - 5.1 Режим холостого ходу
 - 5.2 Режим номінального навантаження
 - 5.3 Розрахунок робочих характеристик
- 6 Розрахунок пускового струму, пускового і максимального моментів
 - 6.1 Параметри обмоток ротора з врахуванням струму витіснення
 - 6.2 Параметри обмоток з урахуванням витіснення струму і насичення сталі зубців
 - 6.3 Пусковий струм і пусковий момент
 - 6.4 Максимальний момент
- 7 Тепловий і вентиляційний розрахунки
 - 7.1 Тепловий розрахунок
 - 7.2 Вентиляційний розрахунок
- 8 Маса двигуна та динамічний момент інерції
- 9 Конструкція асинхронного двигуна

Графічна частина (1 аркуш формату А1) має містити: кресленик асинхронного двигуна в двох проекціях.

Пояснювальна записка має таку структуру.

1. Вступна частина, яка містить:
 - титульний аркуш;
 - індивідуальне завдання;
 - анотацію;
 - зміст.
2. Основна частина, яка складається зі:
 - вступу;
 - викладу суті курсового проекту;
 - висновків;
 - переліку посилань.
3. Додатки, які розміщують після основної частини пояснювальної записки КП.

Приблизний обсяг курсового проекту – 40-50 аркушів пояснювальної записки та 1 аркуш графічної частини.

10.4 Вміст вступної частини пояснювальної записки

10.4.1 Титульний аркуш

Титульний аркуш є першою сторінкою курсового проєкту, яка не нумерується. Зразок титульного аркуша пропонується в додатку Г.

На титульному аркуші вказується тема курсового проєкту «Розрахунок і конструювання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу (*свій тип*)».

На титульному аркуші для курсового проєкту подаються: тема; зазначення спеціальності, умовне позначення згідно з прийнятою системою (див. далі); перераховується науковий ступінь та вчене звання керівника. Підписи керівника та студента із зазначенням термінів обов'язкові.

Для курсового проєкту доцільною є предметна система умовних позначень, яка має таку структуру:

08-24.XXX.0XX.XX.XXX ПЗ

1 2 3 4 5 6

де 1 (XX-XX) – числовий шифр кафедри, прийнятий у ВНТУ (08-24);

2 (XXX) – умовне скорочення для дисципліни (ЕМ);

3 (XXX) – перша цифра 0, якщо це проєкт, або 1, якщо робота, друга і третя цифри означають рік, наприклад, 24 – 2024 рік);

4 (XX) – варіант завдання на курсовий проєкт (наприклад, 01, 02, ...);

5 (XXX) – перший символ – номер групи (1 або 2), наступні два символи задають номер студента за списком у журналі академічної групи;

6 (XX) – код документа (ПЗ – пояснювальна записка).

Проєкт, який подається у вигляді копії, до захисту не приймається.

10.4.2 Індивідуальне завдання

Зміст кожного курсового проєкту, етапи виконання визначає керівник на підставі індивідуального завдання, затвердженого на засіданні кафедри та підписаного завідувачем кафедри.

Попередньо керівник видає індивідуальне завдання до курсового проєкту.

Індивідуальне завдання в перелік змісту не вноситься і має бути другою сторінкою після титульного аркуша. Зразок індивідуального завдання до КП наведено в додатку А. Обов'язковим в індивідуальному завданні є наведення вхідних і вихідних даних.

З навчальною метою зміст може висвітлюватись в індивідуальному завданні. Індивідуальне завдання до курсового проєкту має містити термін видачі, підписи керівника та студента.

Завдання на курсовий проєкт має бути підготовлено і видано викладачем не пізніше другого тижня з початку навчального семестру, підписано викладачем, який видав завдання, та студентом, що прийняв його до виконання.

10.4.3 Анотація

Анотація призначена для ознайомлення з текстовим документом курсового проєкту. В анотації коротко характеризують мету роботи, засоби, необхідні для розв'язання поставленої задачі, наводять стислу інформацію про досягнуті результати. Розмір анотації зазвичай становить третю частину сторінки (не має перевищувати половину сторінки). Анотацію розміщують безпосередньо за аркушем з індивідуальним завданням, починаючи з нової сторінки.

10.4.4 Зміст

Зміст розташовують безпосередньо після анотації, починаючи з нової сторінки. До змісту вносять: вступ; послідовно перелічені назви всіх розділів, підрозділів; висновки; перелік використаних джерел; назви додатків і номери сторінок, які містять початок матеріалу. В зміст не вносять титульний аркуш, індивідуальне завдання на курсовий проєкт та анотацію. Нумерація у змісті починається зі ВСТУПУ (відповідно до нумерації у пояснювальній записці). Сам зміст за нумерацією пояснювальної записки є третьою сторінкою (якщо анотація не займає більше одного аркуша). Нумерація сторінок має бути наскрізною, охоплюючи додатки.

Назви заголовків змісту мають однозначно відповідати назвам заголовків пояснювальної записки за текстом. Формування змісту у текстовому документі бажано здійснювати автоматично.

Приклад оформлення змісту:

ВСТУП

1 ЗАГОЛОВОК ПЕРШОГО РОЗДІЛУ ...

1.1 Заголовки підрозділів

1.1.1 ...

.....

2 ЗАГОЛОВОК ДРУГОГО РОЗДІЛУ

2.1 Заголовки підрозділів

2.1.1 ...

.....

3 ЗАГОЛОВОК ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

3.1 Заголовки підрозділів

3.1.1 ...

.....

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ

Додаток А Назва першого додатка

Додаток Б Назва другого додатка

.....

10.4.5 Технічне завдання

Першим аркушем додатків до курсового проєкту має бути технічне завдання, оформлене за формою, наведеною у додатку Д. Це документ, що встановлює основне призначення та вимоги до складу конструкторської документації.

Технічне завдання є вихідним документом для здійснення проєктування енергоефективних систем або проведення науково-дослідних робіт, відповідно до якого здійснюється виготовлення, приймання під час введення в дію, а також експлуатація відповідного об'єкта.

10.5 Вміст і оформлення основної частини

10.5.1 Вступ

Вступ пишуть з нової пронумерованої сторінки з заголовком ВСТУП посередині великими літерами з більш високою насиченістю (жирністю) шрифту.

Текст вступу має бути коротким і висвітлювати питання актуальності, значення, сучасний рівень і призначення курсового проєкту. У вступі і далі за текстом не дозволяється використовувати скорочені слова, терміни, крім загальноприйнятих. Якщо у вступі і далі за текстом використовується деяке загальновживане поняття у вигляді аббревіатури, то за першої появи цього поняття воно наводиться повністю, а поруч у дужках наводиться

скорочення. У разі повторного використання введеного поняття можна наводити лише скорочення у вигляді аббревіатури.

У вступі вказується:

- галузь використання та призначення об'єкта дослідження;
- мета та загальна постановка задачі;
- об'єкт і предмет проєктування;
- актуальність, яка має подаватись в останньому абзаці вступу з метою стислого викладу суті проєкту, що дозволяє ефективно вирішити поставлену задачу.

Обсяг вступу не має перевищувати 1–2 сторінок.

10.5.2 Опис основної частини курсового проєкту

Основна частина містить текст пояснювальної записки курсового проєкту, в якій наводяться розрахунки складових асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у послідовності, вказаній в індивідуальному завданні.

Для кожного студента обсяг пояснювальної записки має бути приблизно однаковим. Це пов'язано з тим, що проєктування асинхронного двигуна має однакову методику, викладену в цьому навчальному посібнику.

Кожен студент оформлює пояснювальну записку відповідно до проведених розрахунків, приклад яких наведено в додатку Е.

10.5.3 Висновки

Висновки оформляють з нової пронумерованої сторінки, слово «ВИСНОВКИ» наводять посередині великими літерами більш високої насиченості.

У висновках наводяться основні результати роботи над курсовим проєктом. На основі проведеного проєктування надаються обґрунтовані висновки щодо розрахунків та вибору основних складових асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

10.5.4 Оформлення переліку посилань

Перелік містить список літературних джерел, на які мають бути обов'язкові посилання в тексті пояснювальної записки. Література (книги, статті, патенти, журнали) в загальний список записується в порядку посилання на неї в тексті. В цьому переліку дається оформлений,

відповідно до вимог чинних державних стандартів (ДСТУ 8302:2015), список тих джерел (книги, підручники, журнали, електронні адреси), які було використано в процесі виконання роботи та на які є посилання в тексті пояснювальної записки. Кожне джерело має бути вказано разом з видавництвом, роком видання, кількістю сторінок. Літературу записують мовою оригіналу. В списку кожену літературу записують з абзацу, нумерують арабськими цифрами, починаючи з одиниці. Правильне оформлення певного джерела інформації можна переглянути у переліку літературних джерел. Якщо у списку використаних джерел є посилання на Інтернет-сторінки, то їх потрібно наводити разом з назвою.

Використані джерела різного характеру оформляються відповідно до [10].

Приклад оформлення посилань на книги.

1. Краснянський М. Ю. Енергозбереження : навчальний посібник. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2018. 136 с.
2. Основи енерго- і ресурсозбереження : навчальний посібник / Г. І. Канюк та ін. Харків : Друкарня «Мадрид», 2016. 230 с.
3. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України / А. В. Праховник, В. І. Дешко, О. М. Закладний та ін. Луганськ : Місячне сяйво, 2010. 696 с.

Приклад оформлення посилань на web-сторінки, електронні джерела.

4. Бомбик В. С., Коритний А. В. Перспективи використання пакета прикладних програм LabView для створення віртуальних лабораторних стендів для дисципліни «Електричні машини». *Матеріали LII науково-технічної конференції факультету електроенергетики та електромеханіки* (2023), м. Вінниця, 21.06.2023–23.06.2023. URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/18566>

10.5.5 Оформлення додатків

Додатки мають містити матеріал, який не увійшов в основні розділи пояснювальної записки. Кожен додаток необхідно починати з нової

сторінки, вказуючи зверху посередині рядка слово «Додаток» і через пропуск – його позначення. Додатки позначають послідовно великими українськими літерами, за винятком літер Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь, наприклад, Додаток А, Додаток Б.

Кожен додаток може мати змістовний заголовок, який записують посередині рядка малими літерами з першої великої. Сторінки додатків нумеруються, продовжуючи загальну нумерацію пояснювальної записки. Всі додатки вносять у зміст, вказуючи номер додатка, заголовок і номер сторінки, з яких вони починаються. Приклад оформлення додатків можна переглянути у додатках до цього навчального посібника.

10.5.6 Графічна частина

Під час виконання проєкту необхідно в описовій частині пояснювальної записки подавати посилання на графічну частину.

Завершальним етапом виконання курсового проєкту є конструювання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Студенти виконують кресленики асинхронного двигуна в двох проекціях. Обсяг графічної частини становить 1 аркуш формату А1.

Всі написи на кресленику потрібно виконувати креслярськими шрифтами відповідно до серії стандартів ДСТУ ISO 3098:2007.

Посилання на графічну частину виконують за формою: «... наведено на схемі 08-24.ЕМ.01.01.00.000 СК».

10.6 Порядок виконання і захисту курсового проєкту

Графік виконання курсового проєкту визначається індивідуальним завданням, підписаним викладачем. Готовність до захисту КП визначає керівник за результатами планових перевірок якості розділів пояснювальної записки та висновків (згідно з графіком попереднього захисту). Якщо кожен розділ виконано в повному обсязі і немає принципових помилок, керівник допускає студента до захисту. В іншому випадку електронний варіант окремих розділів роботи повертається студенту на доопрацювання протягом вказаного терміну. Після позитивного висновку про готовність всіх розділів курсового проєкту студент має його захистити перед комісією у складі двох викладачів, які призначені кафедрою.

10.7 Критерії оцінювання курсового проєкту

Оцінювання курсового проєкту здійснюється за 100-бальною шкалою. Критерії оцінювання наведено в таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Критерії оцінювання курсового проєкту

Рівень компетентності	За бальною шкалою	За шкалою ЕКТС	Критерії оцінювання
IV Високий (творчий)	90 – 100	A	Виставляється, якщо: а) під час відповіді на питання виявлено всебічні, систематизовані, глибокі знання матеріалу; б) проєкт відповідає вимогам і поданий до захисту у визначений кафедрою термін; в) на захисті студент твердо і впевнено відповів на запитання членів комісії.
III Достатній (конструктивний)	82-89	B	Виставляється, якщо: а) студент продемонстрував досить високі теоретичні знання, що стосуються теми курсового проєкту; б) під час захисту було показано здатність професійно відстоювати свої погляди; г) роботу виконано відповідно до встановлених вимог та подано до захисту у зазначені терміни; д) припускаються несуттєві неточності у викладенні матеріалу та у відповідях.
	75-81	C	Виставляється, якщо: а) студент продемонстрував достатньо повні знання з поставлених питань і задач та проявив вміння викладати основні ідеї, відповів на більшість запитань членів комісії; б) було виявлено здатність самостійно застосовувати вивчений матеріал на практиці. в) студент надає свої пропозиції і рекомендації з предмета дослідження, але має труднощі щодо їх обґрунтування.

Продовження таблиці 10.1

II Середній (репродуктивний)	64-74	D	Виставляється, якщо: а) студент показав достатні теоретичні знання, виявляє знання та розуміння основних положень, з допомогою викладача може аналізувати матеріал, робити висновки; б) відповіді на питання неповні, містять неточності; в) студент не може сформулювати пропозиції і рекомендації з теми дослідження чи обґрунтувати їх; г) допущено помилки в оформленні роботи.
	60-63	E	Виставляється, якщо: а) студент продемонстрував задовільні знання матеріалу на рівні, вищому за початковий, виявив здатність за допомогою викладача логічно відтворювати значну частину матеріалу; б) під час відповіді на запитання виникають труднощі у деяких положеннях, відповіді не повні; в) студент не сформулював пропозиції і рекомендації з теми дослідження; г) допущено помилки в оформленні проєкту; д) проєкт подано до захисту пізніше визначеного кафедрою терміну.
I Низький	35-59	FX	Виставляється, якщо: а) студент володіє теорією на рівні фрагментів, викладає матеріал уривчасто, утруднюється в обґрунтуванні рішень, на запитання викладача дає неправильні відповіді (40-60 %), пояснення не до ладу; б) студент самостійно, без допомоги викладача, не може сформулювати алгоритм рішення задачі; в) допущено чимало помилок в оформленні проєкту; г) проєкт подано до захисту пізніше визначеного кафедрою терміну.
	0-34	F	Виставляється, якщо: а) студент володіє теорією на рівні фрагментів, викладає матеріал уривчасто, утруднюється в обґрунтуванні рішень, на запитання викладача дає неправильні відповіді (60-100 %); б) студент самостійно, без допомоги викладача, не може сформулювати алгоритм рішення задачі; в) проєкт до захисту не подано

Розподіл балів, які студенти отримують за виконання курсового проєкту, наведено в таблиці 10.2.

Таблиця 10.2 – Розподіл балів, які студенти отримують за виконання курсового проєкту

Пояснювальна записка (оцінюються результати проєктування та їх оформлення)	Ілюстративна частина	Захист роботи	Сума
до 50-40	до 10-20	до 40	100

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Булига Ю. В., Громова Л. П., Обертюх Р. Р. Положення про курсове проектування у Вінницькому національному технічному університеті. Вінниця : ВНТУ, 2018. 42 с.
2. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М., Казак М. О. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2007. 197 с.
3. Півняк Г. Г., Довгань В. П., Шкрабець Ф. П. Електричні машини : навчальний посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. 327 с.
4. Яцун М. А. Електричні машини : навч. посібник. Вид. 2-е, стереот. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. 440 с.
5. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
6. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Електричні машини : підручник. Вид. 2-ге, перероблене і доповн. К. : Знання, 2009. 399 с.
7. Ципленков Д. В., Куваєв Ю. В., Іванов О. Б., Кириллов І. А. Проектування електричних машин : навч. посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2008. 325 с.
8. Куценко Ю. М. та ін. Електричні машини і апарати : навчальний посібник. К. : Аграрна освіта, 2013. 449 с.
9. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю., Мілих В. І. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник. Харків : ФОП Панов А.Н., 2017.
10. Приклади оформлення бібліографічного опису у списку використаних джерел з урахуванням Національного стандарту України ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання», URL: <https://msu.edu.ua/library/wp-content/uploads/2019/02/prykklady-oformlennja-bibliohrafichnoho-opysu-zhidno-dstu-8302.pdf>

Додаток А

Завдання на проектування

Міністерство освіти та науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри КЕМСК _____
_____ П.І.Б.
" ____ " _____ 20 ____ р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
на курсовий проект з дисципліни «Електричні машини»
студента _____ П.І.Б. _____ факультету _____, групи _____

1 *Тема проекту* **Розрахунок і конструювання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу (свій тип)**

2 *Термін здачі студентом закінченого проекту.*

3 *Вихідні дані до проекту* Варіант _____

Показник	Значення
Номінальна корисна потужність P_2 , кВт	
Кількість фаз статора m_1 , шт.	
Схема з'єднань фазних обмоток статора	
Номінальна лінійна напруга $U_{1л}$, В	
Частота мережі f_1 , Гц	
Синхронна частота обертання n_1 , об/хв.	
Ступінь захисту	
Спосіб охолодження	
Виконання за способом монтажу	
Кліматичні умови та категорія розміщення	
Форма кінця вала, що виступає	
Умовне позначення прототипу	
Висота вала h , мм	
Відстань від нижньої частини корпусу до опорної площини лап h_1 , мм	
Товщина стінок корпусу h_2 , мм	
Максимально-допустимий зовнішній діаметр магнітопроводу статора $D_{н1max}$, мм	

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

- 1 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА
- 2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК
 - 2.1 Обмотка статора
 - 2.2 Обмотка короткозамкненого ротора
- 3 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА
 - 3.1 Розрахунок МРС ділянок магнітного кола
 - 3.1.1 МРС повітряного зазору
 - 3.1.2 МРС зубців статора
 - 3.1.3 МРС зубців ротора
 - 3.1.4 МРС спинки статора
 - 3.1.5 МРС спинки ротора
 - 3.1.6 Параметри магнітного кола
- 4 АКТИВНІ ТА ІНДУКТИВНІ ОПОРИ ОБМОТОК
 - 4.1 Опір обмотки статора
 - 4.2 Опір обмотки ротора
 - 4.3 Параметри Г-подібної схеми заміщення
- 5 РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДУ І НОМІНАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ
 - 5.1 Режим холостого ходу
 - 5.2 Режим номінального навантаження
 - 5.3 Розрахунок робочих характеристик
- 6 РОЗРАХУНОК ПУСКОВОГО СТРУМУ, ПУСКОВОГО І МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТІВ
 - 6.1 Параметри обмоток ротора з врахуванням струму витіснення
 - 6.2 Параметри обмоток з урахуванням витіснення струму і насичення сталі зубців
 - 6.3 Пусковий струм і пусковий момент
 - 6.4 Максимальний момент
- 7 ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ
 - 7.1 Тепловий розрахунок
 - 7.2 Вентиляційний розрахунок
 - 7.2.1 Двигуни зі ступенем захисту IP23 і способом охолодження IC01
 - 7.2.2 Двигуни зі ступенем захисту IP44 і способом охолодження IC0141
- 8 МАСА ДВИГУНА ТА ДИНАМІЧНИЙ МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ
- 9 КОНСТРУКЦІЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників)

Кресленики асинхронного двигуна в двох проєкціях та схема-розгортка його обмотки (формат А1)

6 Дата видачі завдання _____.

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

_____ (підпис)

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

Додаток Б

Вихідні дані для проектування

Дані наведено в табл. Б.1.

Таблица Б.1 – Дані для проектування

№ вар.	P_2 , кВт	$n_{lн}$, об/хв	$U_{лн}$, В	Ступінь захисту	Спосіб охолодж.	h , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	$D_{н1max}$, мм	Умовне позначення
1	2,2	750	220/380	IP44	IC0141	112	5	8,5	197	4A112MA8Y3
2	3	750	220/380	IP44	IC0141	112	5	8,5	197	4A112MB8Y3
3	3	1000	220/380	IP44	IC0141	112	5	8,5	197	4A112MA6Y3
4	4	1000	220/380	IP44	IC0141	112	5	8,5	197	4A112MB6Y3
5	5,5	1500	220/380	IP44	IC0141	112	5	8,5	197	4A112M4Y3
6	7,5	3000	220/380	IP44	IC0141	112	5	8,5	197	4A112M2Y3
7	7,5	750	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160S8Y3
8	11	750	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160M8Y3
9	11	1000	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160S6Y3
10	15	1000	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160M6Y3
11	15	1500	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160S4Y3
12	18,5	1500	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160M4Y3
13	15	3000	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160S2Y3
14	18,5	3000	220/380	IP44	IC0141	160	6	11,5	285	4A160M2Y3
15	18,5	750	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200M8Y3
16	22	750	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200L8Y3
17	22	1000	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200M6Y3
18	30	1000	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200L6Y3
19	37	1500	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200M4Y3
20	45	1500	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200L4Y3
21	37	3000	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200M2Y3
22	45	3000	220/380	IP44	IC0141	200	7	13,5	359	4A200L2Y3
23	22	750	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200M8Y3
24	30	750	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200L8Y3
25	30	1000	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200M6Y3
26	37	1000	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200L6Y3
27	45	1500	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200M4Y3
28	55	1500	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200L4Y3
29	55	3000	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200M2Y3
30	75	3000	380/660	IP23	IC01	200	7	13,5	359	4AH200L2Y3
31	18,5	1500	380/660	IP23	IC01	160	6	11,5	285	4AH160S4Y3
32	22	3000	380/660	IP23	IC01	160	6	11,5	285	4AH160S2Y3
33	30	3000	380/660	IP23	IC01	160	6	11,5	285	4AH160M2Y3
34	37	750	380/660	IP23	IC01	225	7	15	406	4AH225M8Y3

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	P_2 , кВт	$n_{I\text{н}}$, об/хв	$U_{1л}$, В	Ступінь захисту	Спосіб охолодж.	h , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	$D_{н1\text{max}}$, мм	Умовне позначення
35	75	1500	380/660	IP23	IC01	225	7	15	406	4AH225M4Y3
36	90	3000	380/660	IP23	IC01	225	7	15	406	4AH225M2Y3
37	45	1000	380/660	IP23	IC01	225	7	15	406	4AH225M6Y3
38	37	3000	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180S2Y3
39	45	3000	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180M2Y3
40	30	1500	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180S4Y3
41	15	750	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180S8Y3
42	37	1500	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180M4Y3
43	18,5	750	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180M8Y3
44	18,5	1000	380/660	IP23	IC01	180	7	12	322	4AH180S6Y3
45	4	3000	220/380	IP44	IC0141	100	5	7,5	175	4A100S2Y3
46	3	1500	220/380	IP44	IC0141	100	5	7,5	175	4A100S4Y3
47	2,2	1000	220/380	IP44	IC0141	100	5	7,5	175	4A100L6Y3
48	1,5	750	220/380	IP44	IC0141	100	5	7,5	175	4A100L8Y3
49	4	1500	220/380	IP44	IC0141	100	5	7,5	175	4A100L4Y3
50	5,5	3000	220/380	IP44	IC0141	100	5	7,5	175	4A100L2Y3
51	30	3000	220/380	IP44	IC0141	180	7	12	322	4A180M2Y3
52	18,5	1000	220/380	IP44	IC0141	180	7	12	322	4A180M6Y3
53	15	750	220/380	IP44	IC0141	180	7	12	322	4A180M8Y3
54	30	1500	220/380	IP44	IC0141	180	7	12	322	4A180M4Y3
55	22	1500	220/380	IP44	IC0141	180	7	12	322	4A180S4Y3
56	55	3000	220/380	IP44	IC0141	225	7	15	406	4A225M2Y3
57	55	1500	220/380	IP44	IC0141	225	7	15	406	4A225M4Y3
58	30	750	220/380	IP44	IC0141	225	7	15	406	4A225M8Y3
59	75	3000	220/380	IP44	IC0141	250	8	16	425	4A250S2Y3
60	55	1000	220/380	IP44	IC0141	250	8	16	425	4A250M6Y3
61	37	750	220/380	IP44	IC0141	250	8	16	425	4A250S8Y3
62	45	750	220/380	IP44	IC0141	250	8	16	425	4A250M8Y3
63	110	3000	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250S2Y3
64	132	3000	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250M2Y3
65	55	1000	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250S6Y3
66	90	1500	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250S4Y3
67	75	1000	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250M6Y3
68	45	750	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250S8Y3
69	55	750	380/660	IP23	IC01	250	8	16	425	4AH250M8Y3
70	22	1500	380/660	IP23	IC01	160	6	11,5	285	4AH160M4Y3

Додаток В

Таблиця В.1 – Каталогні дані асинхронних двигунів серії 4А

№ вар.	Тип двигуна	P_{2H}	$B_{\delta H}$	A_{1H}	Δ_{1H}	η_H	$\cos\varphi_H$	X_M	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2	$R_{K\zeta H}$	$X_{K\zeta H}$	S_H	$S_{кр}$	k_{ni}	k_{nm}	k_M	$I_{i\delta}$	$m_{\delta\phi}$	n_1
		кВт	Тл	А/см	А/мм ²	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	кг·м ²	кг	об/хв
45	4А100S2У3	4	0,67	232	5,2	0,88	0,89	3,4	0,054	0,055	0,036	0,099	0,091	0,11	0,033	0,28	7,5	2	2,5	0,0059	36	3000
50	4А100L2У3	5,5	0,68	247	5,6	0,88	0,91	3,8	0,05	0,054	0,036	0,11	0,087	0,1	0,034	0,29	7,5	2	2,5	0,0075	42	
6	4А112М2У3	7,5	0,7	252	5,7	0,875	0,88	3,7	0,046	0,058	0,028	0,14	0,077	0,15	0,025	0,17	7,5	2	2,8	0,01	56	
13	4А160S2У3	15	0,72	335	6,3	0,88	0,91	4	0,052	0,092	0,022	0,12	0,081	0,16	0,021	0,12	7	1,4	2,2	0,048	130	
14	4А160М2У3	18,5	0,7	355	6,5	0,885	0,92	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12	0,079	0,16	0,021	0,125	7	1,4	2,2	0,058	145	
33	4АН160М2У3	30	0,7	491	9	0,915	0,91	6,1	0,062	0,12	0,028	0,15	0,1	0,2	0,029	0,125	7	1,3	2,2	0,055	130	
32	4АН160S2У3	22	0,77	460	8,4	0,875	0,88	4,8	0,068	0,12	0,029	0,15	0,11	0,21	0,018	0,125	7	1,2	2,2	0,08	110	
39	4АН180М2У3	45	0,79	482	7	0,916	0,91	4,6	0,038	0,089	0,021	0,11	0,066	0,15	0,019	0,125	7	1,3	2,2	0,093	185	
38	4АН180S2У3	37	0,83	448	6,3	0,91	0,91	3,6	0,035	0,084	0,019	0,1	0,06	0,14	0,018	0,125	7	1,2	2,2	0,08	170	
51	4А180М2У3	30	0,79	366	5,2	0,905	0,9	3,8	0,03	0,073	0,018	0,11	0,054	0,13	0,018	0,125	7,5	1,4	2,5	0,085	185	
21	4А200М2У3	37	0,82	403	4,8	0,9	0,89	4,1	0,029	0,094	0,021	0,12	0,06	0,16	0,019	0,115	7,5	1,4	2,5	0,15	255	
22	4А200L2У3	45	0,79	407	4,9	0,91	0,9	4,9	0,027	0,088	0,02	0,13	0,058	0,15	0,018	0,115	7,5	1,4	2,5	0,17	280	
29	4АН200М2У3	55	0,83	465	5,7	0,91	0,9	4,1	0,027	0,087	0,019	0,12	0,057	0,15	0,02	0,115	7	1,3	2,5	0,16	265	
30	4АН200L2У3	75	0,82	508	6,2	0,92	0,9	5,2	0,028	0,094	0,021	0,14	0,063	0,17	0,02	0,115	7	1,3	2,5	0,19	295	
56	4А225М2У3	55	0,74	405	5	0,91	0,92	6,6	0,026	0,092	0,019	0,12	0,055	0,16	0,019	0,11	7	1,2	2,2	0,24	225	
36	4АН225М2У3	90	0,92	525	6,4	0,925	0,88	4,8	0,028	0,1	0,021	0,12	0,059	0,17	0,019	0,11	7	1,2	2,2	0,24	355	
59	4А250S2У3	75	0,77	400	4,4	0,91	0,89	4,8	0,021	0,08	0,015	0,13	0,05	0,16	0,014	0,1	7,5	1,2	2,5	0,47	470	
64	4АН250М2У3	132	0,8	569	6,3	0,935	0,88	6,9	0,027	0,1	0,02	0,15	0,066	0,2	0,019	0,1	7	1,2	2,2	0,49	505	
63	4АН250S2У3	110	0,87	505	5,6	0,93	0,86	5,5	0,025	0,094	0,018	0,14	0,059	0,18	0,016	0,1	7	1,2	2,2	0,44	465	

Продовження таблиці В.1

№ вар.	Тип двигуна	$P_{2н}$	$B_{\deltaн}$	$A_{1н}$	$\Delta_{1н}$	η_n	$\cos\varphi_n$	X_m	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2	$R_{к\epsilon_n}$	$X_{к\epsilon_n}$	s_n	$s_{кр}$	k_{ni}	k_{nm}	k_m	I_{∂}	$m_{\partial\partial}$	n_1
		кВт	Тл	А/см	А/мм ²	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	кг·м ²	кг	об/хв
48	4A100L8Y3	1,5	0,87	248	6,4	0,75	0,65	1,5	0,11	0,16	0,093	0,32	0,21	0,36	0,07	0,27	4	1,6	1,9	0,013	42	750
1	4A112MA8Y3	2,2	0,91	263	6,9	0,765	0,71	1,5	0,093	0,11	0,083	0,17	0,19	0,22	0,06	0,23	5	1,9	2,2	0,017	56	
2	4A112MB8Y3	3	0,88	271	6,7	0,795	0,74	1,6	0,08	0,11	0,083	0,17	0,17	0,21	0,058	0,35	5	1,9	2,2	0,025	56	
7	4A160S8Y3	7,5	0,78	274	6,3	0,86	0,75	2	0,075	0,14	0,032	0,18	0,13	0,2	0,025	0,145	6	1,4	2,2	0,14	135	
8	4A160M8Y3	11	0,79	284	6,7	0,87	0,75	2	0,066	0,13	0,031	0,18	0,12	0,19	0,025	0,15	6	1,4	2,2	0,18	160	
53	4A180M8Y3	15	0,81	378	6,4	0,88	0,82	2,4	0,064	0,13	0,03	0,17	0,12	0,22	0,026	0,13	5,5	1,2	2	0,25	195	
41	4AH180S8Y3	15	0,81	377	6,4	0,87	0,8	2,5	0,066	0,14	0,031	0,17	0,13	0,23	0,026	0,13	5,5	1,2	1,9	0,24	170	
43	4AH180M8Y3	18,5	0,75	373	6,1	0,886	0,8	2,9	0,061	0,14	0,032	0,18	0,12	0,24	0,027	0,13	5,5	1,2	1,9	0,3	190	
15	4A200M8Y3	18,5	0,79	379	6,1	0,885	0,84	2,6	0,057	0,13	0,026	0,16	0,11	0,19	0,023	0,13	5,5	1,2	2,2	0,4	270	
16	4A200L8Y3	22	0,75	404	6,7	0,885	0,84	3,1	0,062	0,14	0,029	0,18	0,12	0,21	0,027	0,13	5,5	1,2	2	0,45	310	
23	4AH200M8Y3	22	0,75	403	6,5	0,89	0,84	2,9	0,056	0,13	0,027	0,17	0,11	0,2	0,026	0,13	5,5	1,3	2	0,49	260	
24	4AH200L8Y3	30	0,76	379	6	0,895	0,82	2,9	0,049	0,13	0,026	0,17	0,099	0,19	0,023	0,13	5,5	1,3	2	0,58	315	
58	4A225M8Y3	30	0,87	397	6,8	0,905	0,81	2,3	0,045	0,12	0,022	0,17	0,09	0,19	0,018	0,115	6	1,3	2,1	0,74	225	
34	4AH225M8Y3	37	0,83	416	6,4	0,91	0,81	2,9	0,05	0,13	0,023	0,18	0,099	0,2	0,02	0,115	5,5	1,2	1,9	0,83	355	
61	4A250S8Y3	37	0,81	395	5,9	0,9	0,83	2,8	0,017	0,11	0,017	0,18	0,088	0,2	0,016	0,09	6	1,2	2	1,2	490	
62	4A250M8Y3	45	0,83	382	5,4	0,91	0,84	2,6	0,037	0,099	0,016	0,17	0,075	0,18	0,014	0,09	6	1,2	2	1,4	535	
68	4AH250S8Y3	45	0,84	410	5,9	0,915	0,81	3	0,044	0,11	0,018	0,19	0,086	0,2	0,015	0,09	5,5	1,2	1,9	1,19	490	
69	4AH250M8Y3	55	0,83	425	6,2	0,925	0,81	3	0,042	0,11	0,018	0,19	0,086	0,2	0,016	0,09	6	1,2	1,9	1,4	535	

Додаток Г

Приклад оформлення титульного аркуша

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем та комплексів

КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

з дисципліни «Електричні машини»
на тему: «Розробка і конструювання трифазного асинхронного двигуна з
короткозамкненим ротором типу 4АН200Л8У3»

Студента 3 курсу 1ЕМ-206 групи
напряму підготовки 141
спеціальності Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

Назара ГУДЗЕВИЧА

(прізвище та ініціали)

Керівник ст. викл. каф. КЕМСК

(посада, вчене звання)

К.І.Н. Бомбик В.С.

(науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

м. Вінниця – 2023 рік

Дата та дата	Дата
№ дубл.	№ дубл.
На зам.	На зам.
Дата	Дата
№	№

Додаток Д
Приклад оформлення технічного завдання

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник проєкту к.т.н., ст. викл. каф. КЕМСК

_____ Вадим БОМБИК
«____» _____ 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

На курсовий проєкт з теми: Розрахунок і конструювання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4А100S2У3

На розробку пристрою Асинхронний двигун 4А100S2У3

1 Призначення виробу і галузь використання

Асинхронний двигун призначений для перетворення електричної енергії змінного струму в механічну енергію. Область застосування – всі галузі народного господарства.

2 Склад виробу

Робоча машина являє собою рухому обертову частину – ротор, нерухому – статор. Статор складається зі станини з лапами; сталевого осердя із штампованих, ізольованих один від одного, листів електротехнічної сталі з пазами для укладання обмотки статора, виготовленої з ізольованого мідного дроту й укладеного в пази осердя.

3 Умови експлуатації

Асинхронний двигун має бути захищений від потрапляння твердих тіл розміром більше 1 мм і від водних бризок (закрита машина). Машина призначена для роботи в закритих приміщеннях з природною самовентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов.

4 Технічні характеристики

Номінальна корисна потужність P_2 , кВт	4
Номінальна лінійна напруга $U_{1л}$, В	380
Синхронна частота обертання n_1 , об/хв.	3000
Коефіцієнт корисної дії η , %	0.85
Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$,	0.85
Маса двигуна $m_{дв}$, кг	34.8

5 Елементна база

Провідники, електротехнічна сталь Ст 2013, лакофарбове покриття, підшипники, корпус і т. ін. виробництва України.

6 Конструктивне виконання

Електродвигун з двома підшипниковими щитами на лапах, з одним горизонтально направленим циліндричним кінцем вала.

7 Показники технологічності

Тривалість включення – 100 %.

Допустима температура для ізоляції класу В – 80 °С.

8 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками та слюсарями КВПіА відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на 3 місяці. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками та техніками-електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

9 Живлення електродвигуна

Живлення електродвигуна має бути виконано напругою 660 В частоти 50 Гц.

10 Етапи виконання курсового проєкту

№ етапу	Назва етапів курсового проєкту	Термін виконання	Примітка
1	Видача завдання		
2	Визначення головних розмірів двигуна		
3	Розрахунок обмоток		
4	Розрахунок магнітного кола		
5	Активні та індуктивні опори обмоток		
6	Режим холостого ходу і номінального навантаження		
7	Розрахунок пускового струму, пускового і максимального моментів		
8	Тепловий і вентиляційний розрахунки		
9	Маса двигуна та динамічний момент інерції		
10	Конструкція асинхронних двигунів		
11	Здача готового курсового проєкту		
12	Захист курсового проєкту		

Крайні терміни виконання КП

«__» _____ 2024 р.

Початок розробки

«__» _____ 2024 р.

Розробив студент групи _____

Додаток Е Приклад розрахунків

Розрахунок здійснюватимемо в математичному ППП MathCAD.

Вихідні дані для проєктування:

Умовне позначення	4A112M4Y3
Ступінь захисту	IP44
Спосіб охолодження	IC0141
Номінальна корисна потужність, кВт	$P_2 := 5.5 \text{ кВт}$
Синхронна частота обертання, об/хв	$n_1 := 1500 \text{ об/хв}$
Кількість фаз обмотки статора	$m_1 := 3 \text{ шт.}$
Номінальна лінійна напруга, В	$U_{1л} := 380 \text{ В}$
Номінальна фазна напруга, В	$U_{1ф} := 220 \text{ В}$
Частота мережі, Гц	$f_1 := 50 \text{ Гц}$
Висота осі обертання, мм	$h := 112 \text{ мм}$
Мінімально допустима відстань від нижньої частини корпусу до опорної площини лап, мм	$h_1 := 5 \text{ мм}$
Товщина стінок корпусу, мм	$h_2 := 8.5 \text{ мм}$
Максимально допустимий зовнішній діаметр сердечника статора, мм	$D_{н1max} := 197 \text{ мм}$

Кількість пар полюсів:

$$p := \frac{60 \cdot f_1}{n_1} = 2 \quad \text{шт.}$$

Кількість полюсів: $2 \cdot p = 4 \text{ шт.}$

Клас ізоляції обмотки статора: B

Клас ізоляції обмотки ротора: B

Тип обмотки статора: одношарова всіпна концентрична обмотка з трапецеїдальними напівзакритими пазами

Пази обмотки ротора: овальної форми напівзакриті зі скосом

1 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ДВИГУНА

Зовнішній діаметр сердечника статора:

$$D_{H1} := D_{H1max} = 197 \text{ мм}$$

Внутрішній діаметр сердечника статора (з табл 1.1):

$$D_1 := 0.68 \cdot D_{H1} - 5 = 128.96 \text{ мм}$$

Коефіцієнт навантаження (з рис. 1.2):

$$k_H := 0.97$$

Коефіцієнт корисної дії (з рис. 1.3):

$$\eta := 0.84$$

Коефіцієнт потужності (з рис. 1.4):

$$\cos\varphi := 0.845$$

Розрахункова потужність:

$$S'_1 := \frac{k_H \cdot P_2 \cdot 10^3}{\eta \cdot \cos\varphi} = 7.516 \times 10^3 \text{ ВА}$$

Значення обмотувального коефіцієнта:

$$k_{obl} := 0.91$$

Значення лінійного навантаження (з рис. 1.5):

$$A_{1_} := 270 \text{ А/см}$$

Індукція в повітряному зазорі (з рис. 1.6):

$$B_{\delta_} := 0.877 \text{ Тл}$$

Значення поправкових коефіцієнтів (з табл. 1.2):

$$k_1 := 1$$

$$k_2 := 1$$

$$k_3 := 0.86$$

Значення лінійного навантаження з урахуванням поправкових коефіцієнтів:

$$A_1 := k_1 \cdot k_3 \cdot A_{1_} = 232.2 \text{ А/см}$$

Значення індукції в повітряному зазорі з урахуванням поправкового коефіцієнта:

$$B_{\delta} := k_2 \cdot B_{\delta_} = 0.877 \text{ Тл}$$

Розрахункова довжина сердечника статора:

$$l'_1 := \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot S'_1}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_{\delta} \cdot k_{obl}} = 140.153 \text{ мм}$$

Вибираємо (з урахуванням округлення):

$$l_1 := 145 \text{ мм}$$

Відношення:

$$\lambda := \frac{l_1}{D_1} = 1.124$$

Гранично допустиме значення (з табл. 1.3):

$$\lambda_{max_} := 1.46 - 0.00071 \cdot D_{H1} = 1.32$$

Значення поправкового коефіцієнта (з табл 1.4):

$$k_4 := 1$$

Гранично допустиме значення з урахуванням поправкового коефіцієнта:

$$\lambda_{max} := k_4 \cdot \lambda_{max_} = 1.32$$

Перевірка: $\lambda = 1.124 < \lambda_{max} = 1.32$

Умова виконується

Коефіцієнт заповнення сталі: $k_c := 0.97$

Кількість пазів на полюс і фазу (з табл. 1.5): $q_1 := 3$

Кількість пазів сердечника статора:

$$z_1 := 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 36 \quad \text{шт.}$$

Кількість пазів сердечника ротора (з табл. 1.6): $z_2 := 34 \quad \text{шт.}$

Повітряний зазор між статором і ротором (з табл. 1.7): $\delta := 0.3 \quad \text{мм}$

Зовнішній діаметр сердечника ротора:

$$D_{н2} := D_1 - 2 \cdot \delta = 128.36 \quad \text{мм}$$

Внутрішній діаметр листів ротора:

$$D_{2_} := 0.23 \cdot D_{н1} = 45.31 \quad \text{мм}$$

Вибираємо (з урахуванням округлення): $D_2 := 46 \quad \text{мм}$

Оскільки $h < 250$ мм, приймаємо: $l_2 := l_1 = 145 \quad \text{мм}$

2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК

2.1 Обмотка статора

Кут зсуву між сусідніми пазами:

$$\alpha := \frac{60}{q_1} = 20 \quad \text{град. ел.}$$

Коефіцієнт розподілу:

$$k_{p1} := \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \frac{\pi}{180}}{2}\right)} = 0.96$$

Діаметральний крок :

$$y_1 := \frac{z_1}{2 \cdot p} = 9$$

Полюсне ділення:

$$\tau := y_1 = 9$$

Приймаємо:

$$y_{l\partial} := y_l = 9$$

Коефіцієнт укорочення кроку: $k_{y1} := 1$

Обмотувальний коефіцієнт:

$$k_{o\partial 1} := k_{p1} \cdot k_{y1} = 0.96$$

Попереднє значення магнітного потоку:

$$\Phi := \frac{B_{\delta} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-6}}{p} = 8.2 \times 10^{-3} \quad \text{Вб.}$$

Попередня кількість витків в фазі:

$$w_1 := \frac{k_n \cdot U_{1\phi}}{4.44 \cdot f_1 \cdot k_{o\partial 1} \cdot \Phi} = 122.143 \quad \text{шт.}$$

Кількість паралельних віток в фазі обмотки статора (з табл.2.1): $a_1 := 1 \quad \text{шт.}$

Попередня кількість ефективних провідників в пазу:

$$N_{n1} := \frac{w_1 \cdot a_1}{p \cdot q_1} = 20.357 \quad \text{шт.}$$

Приймаємо: $N_{nl\partial} := 21 \quad \text{шт.}$

Уточнені значення:

$$w_{l\partial} := N_{nl\partial} \cdot p \cdot \frac{q_1}{a_1} = 126 \quad \text{шт.}$$

$$\Phi_{\partial} := \Phi \cdot \frac{w_1}{w_{l\partial}} = 7.949 \times 10^{-3} \quad \text{Тл.}$$

$$B_{\delta\partial} := B_{\delta} \cdot \frac{w_1}{w_{l\partial}} = 0.85 \quad \text{Вб.}$$

Попереднє значення номінального фазного струму:

$$I_{1н} := \frac{P_2 \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = 11.74 \quad \text{А}$$

Уточнене лінійне навантаження статора:

$$A_{l\partial} := \frac{10 \cdot N_{nl\partial} \cdot z_1 \cdot I_{1н}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = 219.078 \quad \text{А/см}$$

Перевірка: $\frac{A_1 - A_{l\partial}}{A_{l\partial}} \cdot 100 = 5.989 \quad \% \quad \text{похибка менша } 10\%$

Зубцеве (пазове) ділення по внутрішньому діаметру:

$$t_1 := \pi \cdot \frac{D_1}{z_1} = 11.254 \quad \text{мм}$$

Середнє значення магнітної індукції в спинці статора (з табл. 2.2): $B_{cl} := 1.55$ Тл.

Середнє значення магнітної індукції в зубцях статора (з табл. 2.3): $B_{3l} := 1.75$ Тл.

Ширина зубця:

$$b_{3l} := \frac{t_l \cdot B_{\delta\delta}}{k_c \cdot B_{3l}} = 5.636 \quad \text{мм}$$

Висота спинки статора:

$$h_{cl} := \frac{\Phi_\delta \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_l \cdot B_{cl}} = 18.23 \quad \text{мм}$$

Висота паза:

$$h_{nl} := \frac{D_{nl} - D_l}{2} - h_{cl} = 15.79 \quad \text{мм}$$

Більша ширина паза:

$$b_l := \frac{\pi \cdot (D_l + 2h_{nl})}{z_l} - b_{3l} = 8.373 \quad \text{мм}$$

Висота пліща: $h_{ul} := 0.5$ мм

Ширина пліща: $b_{ul} := 0.3 \cdot \sqrt{h} = 3.175$ мм

Менша ширина паза:

$$b_2 := \frac{\pi \cdot (D_l + 2h_{ul} - b_{ul}) - z_l \cdot b_{3l}}{z_l - \pi} = 5.947 \quad \text{мм}$$

Перевірка:

$$z_l \cdot (b_l - b_2) + \pi \cdot (b_2 - b_{ul}) - 2 \cdot \pi \cdot (h_{nl} - h_{ul}) = -7.105 \times 10^{-14}$$

Умова виконується

Площа поперечного перерізу паза в штампі:

$$S_{nl} := \frac{b_l + b_2}{2} \cdot \left(h_{nl} - h_{ul} - \frac{b_2 - b_{ul}}{2} \right) = 99.553 \quad \text{мм}^2$$

Припуски на складання сердечників статора і ротора двигунів через зміщення листів (табл. 2.4): $b_c := 0.1$ мм $h_c := 0.1$ мм

Площа поперечного перерізу паза в світлі:

$$S'_{nl} := \left(\frac{b_l + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left(h_{nl} - h_{ul} - \frac{b_2 - b_{ul}}{2} - h_c \right) = 97.457 \quad \text{мм}^2$$

Середнє значення односторонньої товщини корпусної ізоляції (з табл. 2.5):

$$b_{il} := 0.25 \quad \text{мм}$$

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції:

$$S_i := b_{il} \cdot (2h_{nl} + b_l + b_2) = 11.475 \quad \text{мм}^2$$

Площа поперечного перерізу прокладок:

$$S_{np} := 0.5 \cdot b_I + 0.75 \cdot b_2 = 8.647 \quad \text{мм}^2$$

Площа поперечного перерізу паза, що зайнята обмоткою:

$$S''_{nl} := S'_{nl} - S_i - S_{np} = 77.335 \quad \text{мм}^2$$

Задаємося коефіцієнтом заповнення паза обмоткою: $k_n := 0.75$

Діаметр елементарного ізолюваного проводу:

$$c := 1 \quad d' := \sqrt{\frac{k_n \cdot S''_{nl}}{N_{nl\partial} \cdot c}} = 1.662 \quad d' = 1.662 \quad \text{мм}$$

$$c := 2 \quad d' := \sqrt{\frac{k_n \cdot S''_{nl}}{N_{nl\partial} \cdot c}} = 1.175 \quad d' = 1.175 \quad \text{мм}$$

Вибираємо (з табл. 2.6):

- діаметр ізолюваного проводу: $d' := 1.705 \quad \text{мм}$

- діаметр неізолюваного проводу: $d := 1.62 \quad \text{мм}$

- переріз неізолюваного проводу: $S := 2.06 \quad \text{мм}^2$

Уточнене значення коефіцієнта заповнення паза обмоткою:

$$k_n := \frac{N_{nl\partial} \cdot c \cdot d'^2}{S''_{nl}} = 1.579$$

Уточнене значення ширини шліца:

$$b_{ul\partial} := d' + 2 \cdot b_{il} + 0.4 = 2.605 \quad \text{мм}$$

Оскільки $b_{ul} = 3.175 > b_{ul\partial} = 2.605$, приймаємо

$$b_{ul\partial} := b_{ul} = 3.175 \quad \text{мм}$$

Густина струму в обмотці статора:

$$\Delta_{I_H} := \frac{I_{I_H}}{c \cdot S \cdot a_I} = 2.85 \quad \text{А/мм}^2$$

Питоме теплове навантаження статора:

$$A_{l\partial} \cdot \Delta_{I_H} = 624.288 \quad \text{А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$$

Допустиме значення питомого теплового навантаження статора (з рис. 2.2):

$$A_{l\partial} \Delta_{I_H_don'} := 2.1 \cdot 10^3 \quad \text{А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$$

Поправковий коефіцієнт (табл. 2.7): $k_5 := 1$

З урахуванням класу ізоляції та поправкового коефіцієнта:

$$A_{l\partial} \Delta_{I_H_don} := 0.75 \cdot k_5 \cdot A_{l\partial} \Delta_{I_H_don'} = 1.575 \times 10^3 \quad \text{А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$$

Перевірка:

$$A_{l\delta} \cdot \Delta_{lH} = 624.288 < A_{l\delta} \Delta_{lH_don} = 1.575 \times 10^3$$

Умова виконується

Середнє зубцеве ділення статора:

$$t_{cp1} := \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{n1})}{z_1} = 12.632 \text{ мм}$$

Середня ширина котушки:

$$b_{cp1} := t_{cp1} \cdot y_{l\delta} = 113.686 \text{ мм}$$

Середня довжина лобової частини котушки:

$$l_{l1} := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 15 = 178.708 \text{ мм}$$

Середня довжина витка:

$$l_{cp1} := 2 \cdot (l_1 + l_{l1}) = 647.416 \text{ мм}$$

Довжина випіоту лобової частини:

$$l_{e1} := (0.19 + 0.1 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 10 = 54.338 \text{ мм}$$

2.1 Обмотка короткозамкненого ротора

Висота паза (з рис. 2.4):

$$h_{n2} := 22 \text{ мм}$$

Попереднє значення індукції в зубцях ротора (з табл. 2.8):

$$B_{32} := 1.8 \text{ Тл}$$

Висота спинки ротора:

$$h_{c2} := 0.38 \cdot D_{H2} - h_{n2} = 26.777 \text{ мм}$$

Магнітна індукція в спинці ротора:

$$B_{c2} := \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot h_{c2}} = 1.055 \text{ Тл}$$

Зубцеве ділення по зовнішньому діаметру ротора:

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_{H2}}{z_2} = 11.86 \text{ мм}$$

Ширина зубця:

$$b_{32} := \frac{t_2 \cdot B_{\delta\delta}}{B_{32} \cdot k_c} = 5.775 \text{ мм}$$

Менший радіус паза:

$$r_2 := \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2 \cdot h_{n2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 - \pi)} = 1.113 \text{ мм}$$

Перевірка: $r_2 = 1.113 > 1$ Умова виконується

Приймаємо (для напівзакритого паза):

$$h_{u2} := 0.5 \text{ мм} \quad h_{m2} := 0 \text{ мм} \quad b_{u2} := 1.5 \text{ мм}$$

Більший радіус паза:

$$r_1 := \frac{\pi \cdot (D_{n2} - 2 \cdot h_{u2} - 2 \cdot h_{m2}) - z_2 \cdot b_{s2}}{2 \cdot (z_2 + \pi)} = 2.743 \text{ мм}$$

Відстань між центрами радіусів:

$$h_{y2} := h_{n2} - h_{u2} - h_{m2} - r_1 - r_2 = 17.644 \text{ мм}$$

Перевірка: $\pi \cdot h_{y2} - z_2 \cdot (r_1 - r_2) = -7.105 \times 10^{-15} = 0$. Умова виконується

Площа поперечного перерізу стрижня:

$$S_{cm} := 0.5 \cdot \pi \cdot (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \cdot h_{y2} = 81.796 \text{ мм}^2$$

$$S_{n2} := S_{cm} = 81.796 \text{ мм}^2$$

Поперечний переріз кільця:

$$S_{кл} := 0.35 \cdot z_2 \cdot \frac{S_{cm}}{2 \cdot p} = 243.342 \text{ мм}^2$$

Висота кільця:

$$h_{кл} := 1.2 \cdot h_{n2} = 26.4 \text{ мм}$$

Довжина кільця:

$$l_{кл} := \frac{S_{кл}}{h_{кл}} = 9.218 \text{ мм}$$

Середній діаметр кільця:

$$D_{кл.ср} := D_{n2} - h_{кл} = 101.96 \text{ мм}$$

Коефіцієнт, що враховує згин стрижня:

$$k_L := 0.9$$

Довжина лобової частини стрижня:

$$l_{л2} := 50 \text{ мм}$$

Виліт лобової частини обмотки:

$$l_{\phi 2} := k_L \cdot l_{л2} + l_{кл} = 54.218 \text{ мм}$$

3 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА

3.2 Розрахунок МРС ділянок магнітного кола

3.2.1 МРС повітряного зазору

Коефіцієнти повітряного зазору статора і ротора:

$$k_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{u1}}{t_1 - b_{u1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{u1}}} = 1.237$$

$$k_{\delta 2} := 1 + \frac{b_{u2}}{t_2 - b_{u2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{u2}}} = 1.068$$

Приймаємо: $k_k := 1$ - відсутні радіальні канали

Спільний коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_{\delta} := k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_k = 1.321$$

МРС повітряного зазору:

$$F_{\delta} := 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta \delta} \cdot 10^3 = 269.433 \quad \text{А}$$

3.2.2 МРС зубців статора

$$B_{31} = 1.75 < 1.8 \text{ Тл}$$

Напруженість магнітного поля в зубцях статора (з табл. 3.1): $H_{31} := 13.3 \text{ А/см}$

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{31} := h_{n1} = 15.79 \quad \text{мм}$$

МРС зубців статора:

$$F_{31} := 0.1 \cdot H_{31} \cdot L_{31} = 21 \quad \text{А}$$

3.2.3 МРС зубців ротора

$$B_{32} = 1.8 < 1.8 \text{ Тл}$$

Напруженість магнітного поля в зубцях ротора (з табл. 3.1): $H_{32} := 15.2 \text{ А/см}$

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{32} := h_{n2} - 0.2 \cdot r_2 = 21.777 \quad \text{мм}$$

МРС зубців ротора:

$$F_{32} := 0.1 \cdot H_{32} \cdot L_{32} = 33.102 \quad \text{А}$$

3.2.4 МРС спинки статора

$$2 \cdot p = 4 = 4 \text{ шт.} \quad B_{c1} = 1.55 \text{ Тл}$$

Напруженість магнітного поля в спинці статора (з табл. 3.2): $H_{c1} := 6.3 \text{ А/см}$

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{n1} - h_{c1})}{4 \cdot p} = 70.203 \quad \text{мм}$$

МРС спинки статора:

$$F_{c1} := 0.1 \cdot H_{c1} \cdot L_{c1} = 44.228 \quad \text{А}$$

3.2.5 МРС спинки ротора

$$2 \cdot p = 4 = 4 \text{ шт.} \quad B_{c2} = 1.055 \text{ Тл}$$

$$\text{Напруженість магнітного поля в спинці ротора (з табл. 3.3):} \quad H_{c2} := 1.88 \text{ А/см}$$

$$\text{Діаметр вентиляційних каналів в сердечниках ротора (з табл. 1.8):} \quad d_{k2} := 0 \text{ мм}$$

Середня довжина шляху магнітного потоку:

$$L_{c2} := \frac{\pi \cdot \left(D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3} \cdot d_{k2} \right)}{4 \cdot p} = 28.579 \text{ мм}$$

МРС спинки ротора:

$$F_{c2} := 0.1 \cdot H_{c2} \cdot L_{c2} = 5.373 \text{ А}$$

3.2.6 Параметри магнітного кола

Сумарна МРС магнітного кола на один полюс:

$$F_{\Sigma} := F_{\delta} + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2} = 373.136 \text{ А}$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола:

$$k_{нас} := \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = 1.385$$

Струм намагнічування:

$$I_M := \frac{2.22 \cdot F_{\Sigma} \cdot p}{m_1 \cdot w_{1\delta} \cdot k_{об1}} = 4.566 \text{ А}$$

Струм намагнічування у відносних одиницях:

$$I_{M_{в.о.}} := \frac{I_M}{I_{Ih}} = 0.389 \text{ в.о.}$$

ЕРС холостого ходу:

$$E_{10h} := k_n \cdot U_{1\phi} = 213.4 \text{ В}$$

Головний індуктивний опір:

$$X_M := \frac{E_{10h}}{I_M} = 46.732 \text{ Ом}$$

Головний індуктивний опір у відносних одиницях:

$$X_{M_{в.о.}} := X_M \cdot \frac{I_{Ih}}{U_{1\phi}} = 2.494 \text{ в.о.}$$

4 АКТИВНІ ТА ІНДУКТИВНІ ОПОРИ ОБМОТОК

4.1 Опір обмотки статора

$$\text{Питома електрична провідність міді при 20 град. С:} \quad \gamma_{M_{20}} := 57 \text{ См/ммкм}$$

Активний опір обмотки фази при 20 град. С:

$$R_{l_20} := \frac{w_{l\delta} \cdot l_{cp1}}{\gamma_{M_20} \cdot a_l \cdot c \cdot S \cdot 10^3} = 0.347 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки фази при 20 град. С у відносних одиницях:

$$R_{l_20_e.o} := R_{l_20} \cdot \frac{I_{In}}{U_{l\phi}} = 0.019 \text{ в.о.}$$

Перевірка:

$$R_{l_20_e.o} := \frac{\pi \cdot D_l \cdot A_{l\delta} \cdot \Delta_{In} \cdot l_{cp1}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_l \cdot U_{l\phi} \cdot I_{In}} = 0.019 \text{ в.о.}$$

Розрахунок правильний

Коефіцієнти, що враховують укорочення кроку обмотки при $\beta_{l\delta} := 1$

$$k_{\beta l} := 0.4 + 0.6 \cdot \beta_{l\delta} = 1$$

$$k'_{\beta l} := 0.2 + 0.8 \cdot \beta_{l\delta} = 1$$

Розміри паза (з табл. 4.1): $h_{\kappa l} := 0.7 \text{ мм}$ $h_{\kappa m l} := 0.6 \text{ мм}$ $h_{il} := 0 \text{ мм}$

Розмір обмотки:

$$h_{ml} := h_{nl} - h_{ul} - h_{\kappa l} - h_{\kappa m l} - h_{il} = 13.99 \text{ мм}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання:

$$\lambda_{nl} := \frac{h_{ml}}{3 \cdot b_2} \cdot k_{\beta l} + \left(\frac{3 \cdot h_{\kappa l}}{b_2 + 2 \cdot b_{ul}} + \frac{h_{ul}}{b_{ul}} + \frac{h_{\kappa m l}}{b_2} \right) \cdot k'_{\beta l} = 1.213$$

Коефіцієнт, що враховує вплив відкриття пазів статора на провідність диференційного розсіювання:

$$k_{ul} := 1 - \frac{0.033 \cdot b_{ul}^2}{t_l \cdot \delta} = 0.901$$

Коефіцієнт, що враховує демпфувальну реакцію струмів, наведених в обмотці короткозамкненого ротора вищими гармоніками поля статора (з табл. 4.2):

$$k_{\delta p l} := 0.88$$

Коефіцієнт диференційного розсіювання статора (з табл. 4.3):

$$k_{\delta l} := 0.0141$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання:

$$\lambda_{\delta l} := \frac{0.9 \cdot (t_l \cdot k_{\delta l})^2 \cdot k_{\delta p l} \cdot k_{ul} \cdot k_{\delta l}}{\delta \cdot k_{\delta}} = 2.965$$

Полосне ділення:

$$\tau_{\text{м}} := \frac{\pi \cdot D_l}{2 \cdot p} = 101.285$$

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки:

$$\lambda_{\lambda l} := 0.34 \cdot \frac{q_l}{l_l} \cdot (l_{\lambda l} - 0.64 \cdot \beta_{l\partial} \cdot \tau) = 0.801$$

Коефіцієнт провідності обмотки статора:

$$\lambda_l := \lambda_{nl} + \lambda_{\partial l} + \lambda_{\lambda l} = 4.979$$

Індуктивний опір розсіювання фази статора:

$$X_l := \frac{1.58 \cdot f_l \cdot l_l \cdot w_{l\partial}^2 \cdot \lambda_l}{p \cdot q_l \cdot 10^8} = 1.509 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання фази статора у відносних одиницях:

$$X_{l_{\text{в.о.}}} := X_l \cdot \frac{I_{lH}}{U_{l\phi}} = 0.081 \quad \text{в.о.}$$

Перевірка:

$$X_{l_{\text{в.о.}}} := \frac{0.39 \cdot (D_l \cdot A_{l\partial})^2 \cdot l_l \cdot \lambda_l \cdot 10^{-7}}{m_l \cdot U_{l\phi} \cdot I_{lH} \cdot z_l} = 0.081 \quad \text{в.о.}$$

Розрахунок правильний

4.2 Опір обмотки ротора

Питома електрична провідність алюмінію при 20 град. С: $\gamma_{a_{20}} := 27 \text{ См/мкм}$

Активний опір стрижня при 20 град. С:

$$R_{cm} := \frac{l_2}{\gamma_{a_{20}} \cdot S_{cm} \cdot 10^3} = 6.566 \times 10^{-5} \quad \text{Ом}$$

Коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня при $\frac{t_2}{2 \cdot p} = 2.965$

$$k_{np2} := 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{z_2}\right) = 0.367$$

Опір короткозамкнених кілець, приведений до струму стрижня при 20 град. С:

$$R_{кл} := \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{кл.ср}}{\gamma_{a_{20}} \cdot z_2 \cdot S_{кл} \cdot k_{np2}^2 \cdot 10^3} = 2.123 \times 10^{-5} \quad \text{Ом}$$

$$\beta_{ск} := 1$$

Центральний кут скошу пазів:

$$\alpha_{ск} := \frac{2 \cdot p \cdot t_l \cdot \beta_{ск}}{D_l} = 0.349 \quad \text{рад}$$

Коефіцієнт скошу пазів ротора (з рис. 4.1):

$$k_{ск} := 0.98$$

Коефіцієнт приведення опору обмотки ротора до обмотки статора:

$$k_{np1} := \frac{4 \cdot m_1}{z_2} \cdot \left(\frac{w_{1\partial} \cdot k_{o\partial 1}}{k_{ck}} \right)^2 = 5.375 \times 10^3$$

Активний опір обмотки ротора при 20 град. С, приведений до обмотки статора:

$$R'_{2_20} := k_{np1} \cdot (R_{cm} + R_{кл}) = 0.467 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки ротора при 20 град. С, приведений до обмотки статора, у відносних одиницях:

$$R'_{2_20_в.о} := \frac{R'_{2_20} \cdot I_{1н}}{U_{1\phi}} = 0.025$$

Струм стрижня ротора для номінального режиму:

$$I_{2н} := \frac{2 \cdot w_{1\partial} \cdot k_{o\partial 1} \cdot P_2 \cdot 10^3}{U_{1\phi} \cdot z_2} \cdot \frac{(0.2 + 0.8 \cdot \cos \varphi)}{\eta \cdot \cos \varphi} = 219.487 \text{ А}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання (для напівзакритого паза):

$$\lambda_{n2} := \frac{h_{u2}}{b_{u2}} + \frac{h_{y2} + 0.8 \cdot r_2}{6 \cdot r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2 \cdot S_{cm}} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u2}}{4 \cdot r_1} = 1.681$$

Кількість пазів ротора на полюс і фазу:

$$q_2 := \frac{z_2}{2 \cdot p \cdot m_1} = 2.833 \text{ шт.}$$

Коефіцієнт диференційного розсіювання ротора (з рис. 4.2): $k_{\partial 2} := 0.01$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання:

$$\lambda_{\partial 2} := 0.9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{z_2}{6 \cdot p} \right)^2 \cdot \frac{k_{\partial 2}}{\delta \cdot k_{\delta}} = 2.163$$

Коефіцієнт провідності розсіювання короткозамкнених кілець литої клітки ротора:

$$\lambda_{кл} := \frac{2.9 \cdot D_{кл.ср}}{z_2 \cdot l_2 \cdot k_{np2}} \cdot \log \left(\frac{2.35 \cdot D_{кл.ср}}{h_{кл} + l_{кл}} \right) = 0.368$$

Відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого ділення ротора:

$$\beta_{ск2} := \beta_{ск} \cdot \frac{t_1}{t_2} = 0.949$$

Коефіцієнт провідності розсіювання скосу пазів:

$$\lambda_{ск} := \frac{t_2 \cdot \beta_{ск2}^2}{9.5 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{нас}} = 2.049$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора:

$$\lambda_2 := \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск} = 6.26$$

Індуктивний опір обмотки ротора:

$$X_2 := 7.9 \cdot f_1 \cdot I_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 3.586 \times 10^{-4} \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора:

$$X'_2 := k_{np1} \cdot X_2 = 1.927 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, у відносних одиницях:

$$X'_{2_{\text{в.о}}} := X'_2 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1\phi}} = 0.103 \quad \text{в.о.}$$

Перевірка: $\frac{X_1}{X'_2} = 0.783$ *Розрахунок правильний*

4.3 Параметри Г-подібної схеми заміщення

Поправочний коефіцієнт для класу ізоляції В: $m_m := 1.22$

Коефіцієнт розсіювання статора:

$$\tau_1 := \frac{X_l}{X_m} = 0.032$$

Коефіцієнт опору статора:

$$\rho_1 := \frac{R_{l_{20}} \cdot m_m}{X_l + X_m} = 8.785 \times 10^{-3}$$

Опори Г-подібної схеми заміщення:

$$R'_1 := m_m \cdot R_{l_{20}} = 0.424 \quad \text{Ом}$$

$$X'_1 := X_l \cdot (1 + \tau_1) \cdot \left(1 + \frac{R_{l_{20}} \cdot \rho_1}{X_l} \right) = 1.561 \quad \text{Ом}$$

$$R''_2 := m_m \cdot R'_{2_{20}} \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) = 0.607 \quad \text{Ом}$$

$$X''_2 := X'_2 \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) = 2.054 \quad \text{Ом}$$

ЕРС холостого ходу:

$$E_{10\phi} := \frac{U_{1\phi}}{(1 + \tau_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}} = 213.109 \quad \text{В}$$

Перевірка: $\frac{E_{10\phi} - E_{10н}}{E_{10\phi}} \cdot 100 = -0.136 \quad \% < 3 \% \quad \text{Умова виконується}$

5 РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДУ І НОМІНАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

5.1 Режим холостого ходу

Маса сталі зубців статора:

$$m_{z1} := 7.8 \cdot z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{n1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = 3.515 \text{ кг}$$

Магнітні втрати в зубцях статора:

$$\Delta p_{mz1} := 4.4 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = 47.363 \text{ Вт}$$

Маса сталі спинки статора:

$$m_{c1} := 7.8 \cdot \pi \cdot (D_{n1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = 11.232 \text{ кг}$$

Магнітні втрати в спинці статора:

$$\Delta p_{mc1} := 4.4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 118.737 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в сердечнику статора з врахуванням додаткових втрат в сталі:

$$\Delta p_{m1} := \Delta p_{mz1} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sqrt{0.1 \cdot t_1 \cdot (k_\delta - 1)^2} \right] + \Delta p_{mc1} = 198.307 \text{ Вт}$$

Коефіцієнт механічних втрат: $k_{mx} := 1$

Механічні втрати при ступені захисту IP44 і способі охолодження IC0141:

$$\Delta p_{mx} := k_{mx} \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{n1}}{100} \right)^4 = 33.888 \text{ Вт}$$

Реактивна складова струму статора на холостому ході:

$$I_{0p} := \frac{U_{1\phi}}{X_m \cdot (1 + \tau_1) \cdot (1 + \rho_1^2)} = 4.56 \text{ А}$$

Електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta p_{el10} := m_1 \cdot I_{0p}^2 \cdot R'_1 \cdot (1 + \rho_1^2) = 26.439 \text{ Вт}$$

Активна складова струму статора на холостому ході:

$$I_{0a} := \frac{\Delta p_{m1} + \Delta p_{mx} + \Delta p_{el10}}{m_1 \cdot U_{1\phi}} = 0.392 \text{ А}$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} = 4.577 \text{ А}$$

Коефіцієнт потужності на холостому ході:

$$\cos \varphi_0 := \frac{I_{0a}}{I_0} = 0.086$$

Активна складова струму холостого ходу, обумовлена магнітними втратами:

$$I_{0ам} := \frac{\Delta p_{м1}}{m_1 \cdot U_{1ф}} = 0.3 \quad \text{А}$$

Опір кола намагнічування:

$$R_M := \frac{\Delta p_{м1}}{m_1 \cdot I_{0ам}^2} = 732.199 \quad \text{Ом}$$

5.2 Режим номінального навантаження

Активний опір короткого замикання:

$$R_K := R'_1 + R''_2 = 1.031 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_K := X'_1 + X''_2 = 3.615 \quad \text{Ом}$$

Повний опір короткого замикання:

$$Z_K := \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = 3.759 \quad \text{Ом}$$

Додаткові втрати при номінальному навантаженні:

$$\Delta p_{дн} := 0.005 \cdot \frac{P_2 \cdot 10^3}{\eta} = 32.738 \quad \text{Вт}$$

Механічна потужність:

$$P_{мхн} := P_2 \cdot 10^3 + \Delta p_{мх} + \Delta p_{дн} = 5.567 \times 10^3 \quad \text{Вт}$$

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$R_{нав.н} := \left(\frac{m_1 \cdot U_{1ф}^2}{2 \cdot P_{мхн}} - R_K \right) + \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_{1ф}^2}{2 \cdot P_{мхн}} - R_K \right)^2 - Z_K^2} = 23.419 \quad \text{Ом}$$

Повний опір схеми заміщення:

$$Z_{нав.н} := \sqrt{(R_{нав.н} + R_K)^2 + X_K^2} = 24.715 \quad \text{Ом}$$

$$\text{Перевірка: } \frac{R_{нав.н}}{Z_{нав.н}^2} = 0.038 = \frac{P_{мхн}}{m_1 \cdot U_{1ф}^2} = 0.038 \quad \text{Умова виконується}$$

Номінальне ковзання:

$$s_n := \frac{1}{1 + \frac{R_{нав.н}}{R''_2}} = 0.025$$

Активна складова струму статора холостому ході без врахування механічних втрат:

$$I_{0амх} := \frac{\Delta p_{ел10} + \Delta p_{м1}}{m_I \cdot U_{1\phi}} = 0.341 \text{ А}$$

Струм ротора:

$$I''_{2н} := \frac{U_{1\phi}}{Z_{нав.н}} = 8.901 \text{ А}$$

Активна складова струму статора:

$$I_{1ан} := I_{0амх} + I''_{2н} \cdot \left(\frac{R_{нав.н} + R_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{1 - \rho_I^2}{1 + \rho_I^2} + \frac{X_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_I}{1 + \rho_I^2} \right) = 9.168 \text{ А}$$

Реактивна складова струму статора:

$$I_{1рн} := I_{0р} + I''_{2н} \cdot \left(\frac{X_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{1 - \rho_I^2}{1 + \rho_I^2} - \frac{R_{нав.н} + R_{\kappa}}{Z_{нав.н}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_I}{1 + \rho_I^2} \right) = 5.707 \text{ А}$$

Фазний струм ротора:

$$I_{1н} := \sqrt{I_{1ан}^2 + I_{1рн}^2} = 10.799 \text{ А}$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_{1н} := \frac{I_{1ан}}{I_{1н}} = 0.849$$

Електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta p_{ел1н} := m_I \cdot I_{1н}^2 \cdot R'_I = 148.259 \text{ Вт}$$

Електричні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta p_{ел2н} := m_I \cdot I''_{2н}^2 \cdot R''_2 = 144.327 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати:

$$\Delta p_{\Sigma н} := \Delta p_{ел1н} + \Delta p_{ел2н} + \Delta p_{м1} + \Delta p_{мх} + \Delta p_{\delta н} = 557.519 \text{ Вт}$$

Потужність, що підводиться до двигуна:

$$P_{1н} := P_2 \cdot 10^3 + \Delta p_{\Sigma н} = 6.058 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_n := \left(1 - \frac{\Delta p_{\Sigma н}}{P_{1н}} \right) \cdot 100 = 90.796 \text{ \%}$$

Перевірка: $P_{1н} := m_I \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1ан} = 6.05063 \times 10^3 \text{ Вт}$

Корисна потужність на валу:

$$P_{2H} := m_I \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H} \cdot \frac{\eta_H}{100} = 5.494 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Електромагнітна потужність:

$$P_{eMH} := P_{1H} - \Delta p_{e1H} - \Delta p_{M1} = 5.704 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Перевірка: $\Delta p_{e2H} := s_H \cdot P_{eMH} = 144.153 \text{ Вт}$

Синхронна швидкість обертання:

$$\omega_1 := 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} = 157.08 \text{ рад/с}$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M_H := \frac{P_{eMH}}{\omega_1} = 36.313 \text{ Нм}$$

Частота обертання ротора:

$$n_{2H} := (1 - s_H) \cdot n_1 = 1.462 \times 10^3 \text{ об/хв}$$

Швидкість обертання ротора:

$$\omega_{2H} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{2H}}{60} = 153.11 \text{ рад/с}$$

Корисний момент на валу:

$$M_{2H} := \frac{P_{2H}}{\omega_{2H}} = 35.881 \text{ Нм}$$

Момент холостого ходу:

$$M_0 := M_H - M_{2H} = 0.432 \text{ Нм}$$

5.3 Розрахунок робочих характеристик

Для побудови робочих характеристик двигуна переходимо до відносних одиниць:

$$s := 0.00001, 0.0002 \dots 1.2 \cdot s_H;$$

$$R_{нав.}(s) := \left(\frac{1-s}{s} \right) \cdot R''_2$$

$$Z_{нав.}(s) := \sqrt{(R_{нав.}(s) + R_K)^2 + X_K^2}$$

$$s(s) := \frac{1}{1 + \frac{R_{нав.}(s)}{R''_2}}$$

$$s_{vidh}(s) := \frac{s(s)}{s_H}$$

$$I''_{2.}(s) := \frac{U_{1\phi}}{Z_{нав.}(s)}$$

$$I''_{2.vidh}(s) := \frac{I''_{2.}(s)}{I''_{2H}}$$

$$I_{1a}(s) := I_{0амх} + I''_2(s) \cdot \left(\frac{R_{нав.}(s) + R_{\kappa}}{Z_{нав.}(s)} \cdot \frac{1 - \rho_I^2}{1 + \rho_I^2} + \frac{X_{\kappa}}{Z_{нав.}(s)} \cdot \frac{2 \cdot \rho_I}{1 + \rho_I^2} \right)$$

$$I_{1a.vidn}(s) := \frac{I_{1a}(s)}{I_{1ан}}$$

$$I_{1p}(s) := I_{0p} + I''_2(s) \cdot \left(\frac{X_{\kappa}}{Z_{нав.}(s)} \cdot \frac{1 - \rho_I^2}{1 + \rho_I^2} - \frac{R_{нав.}(s) + R_{\kappa}}{Z_{нав.}(s)} \cdot \frac{2 \cdot \rho_I}{1 + \rho_I^2} \right)$$

$$I_{1p.vidn}(s) := \frac{I_{1p}(s)}{I_{1pн}}$$

$$I_L(s) := \sqrt{I_{1a}(s)^2 + I_{1p}(s)^2}$$

$$I_{L.vidn}(s) := \frac{I_L(s)}{I_{Lн}}$$

$$\cos \varphi_L(s) := \frac{I_{1a}(s)}{I_L(s)}$$

$$\cos \varphi_{L.vidn}(s) := \frac{\cos \varphi_L(s)}{\cos \varphi_{Lн}}$$

$$\cos \varphi_{L.vidn}(s) := \frac{I_{1a}(s)}{I_L(s)}$$

$$\Delta p_{ел1}(s) := m_I \cdot I_L(s)^2 \cdot R'_I$$

$$\Delta p_{ел1.vidn}(s) := \frac{\Delta p_{ел1}(s)}{\Delta p_{ел1н}}$$

$$\Delta p_{ел2}(s) := m_I \cdot I''_2(s)^2 \cdot R''_2$$

$$\Delta p_{ел2.vidn}(s) := \frac{\Delta p_{ел2}(s)}{\Delta p_{ел2н}}$$

$$k_{нав}(s) := \frac{I''_2(s)}{I''_{2н}}$$

$$\Delta p_{\partial}(s) := k_{нав}(s)^2 \cdot \Delta p_{\partialн}$$

$$\Delta p_{\Sigma}(s) := \Delta p_{ел1}(s) + \Delta p_{ел2}(s) + \Delta p_{м1} + \Delta p_{мх} + \Delta p_{\partial}(s)$$

$$\Delta p_{\Sigma.vidn}(s) := \frac{\Delta p_{\Sigma}(s)}{\Delta p_{\Sigmaн}}$$

$$P_L(s) := m_I \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1a}(s)$$

$$P_{L.vidn}(s) := \frac{P_L(s)}{P_{Lн}}$$

$$P_2(s) := P_L(s) - \Delta p_{\Sigma}(s)$$

$$P_{2.vidn}(s) := \frac{P_2(s)}{P_{2н}}$$

$$\eta_{vidn}(s) := \frac{P_2(s)}{P_L(s)}$$

$$P_{ем}(s) := P_L(s) - \Delta p_{ел1}(s) - \Delta p_{м1}$$

$$P_{ем.vidn}(s) := \frac{P_{ем}(s)}{P_{емн}}$$

$$M_1(s) := \frac{P_{em.}(s)}{\omega_1}$$

$$M_{1.vidn}(s) := \frac{M_1(s)}{M_H}$$

$$n_2(s) := (1 - s) \cdot n_1$$

$$n_{2.vidn}(s) := \frac{n_2(s)}{n_1}$$

$$\omega_2(s) := 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_2(s)}{60}$$

$$\omega_{2.vidn}(s) := \frac{\omega_2(s)}{\omega_{2H}}$$

$$M_2(s) := \frac{P_2(s)}{\omega_2(s)}$$

$$M_{2.vidn}(s) := \frac{M_2(s)}{M_{2H}}$$

+

Робочі характеристики двигуна наведено на рис. 5.1.

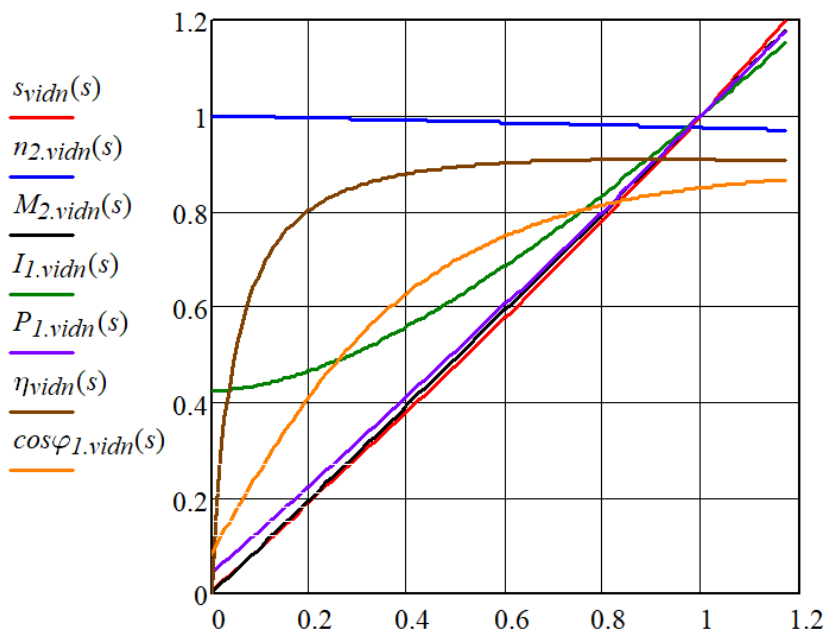


Рисунок 5.1 – Робочі характеристики двигуна

6 РОЗРАХУНОК ПУСКОВОГО СТРУМУ, ПУСКОВОГО І МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТІВ

6.1 Параметри обмоток ротора з врахуванням струму витіснення

$$s := 1$$

Висота стрижня:

$$h_{cm} := h_{n2} - h_{u2} - h_{m2} = 21.5 \text{ мм}$$

Приведена висота стрижня:

$$\xi := 0.0735 \cdot h_{cm} \cdot \sqrt{\frac{s}{m_m}} = 1.431$$

З рис. 6.1: $\phi := 0.25$ $\psi := 0.87$

$$k_R := 1 + \phi = 1.25$$

Активний опір стрижня клітки ротора з урахуванням витіснення струму в ньому:

$$R_{cm\xi} := R_{cm} \cdot k_R = 8.207 \times 10^{-5} \quad \text{Ом}$$

Опір обмотки ротора для пускового режиму:

$$R_{2\xi} := R_{cm\xi} + R_{кл} = 1.033 \times 10^{-4} \quad \text{Ом}$$

Опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, для пускового режиму при 20 град. С:

$$R'_{2\xi_20} := R_{2\xi} \cdot k_{np1} = 0.555 \quad \text{Ом}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання паза ротора при пуску:

$$\lambda_{n2\xi} := \frac{h_{m2}}{b_{u2}} + \left[\frac{h_{y2} + 0.8 \cdot r_2}{6 \cdot r_l} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_l^2}{2 \cdot S_{cm}} \right) + 0.66 - \frac{b_{u2}}{4 \cdot r_l} \right] \cdot \psi = 1.293$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора при пуску:

$$\lambda_{2\xi} := \lambda_{n2\xi} + \lambda_{\partial 2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск} = 5.873$$

Індуктивні опори ротора:

$$X_{2\xi} := X_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi}}{\lambda_2} = 3.364 \times 10^{-4}$$

$$X'_{2\xi} := X'_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi}}{\lambda_2} = 1.808$$

6.2 Параметри обмоток з урахуванням витіснення струму і насичення сталі зубців

Коефіцієнт, що враховує насичення сталі зубців:

$$k_{нсп} := 1.3$$

$$c_l := 1 + \frac{X_l}{X_m} = 1.032$$

$$R_{к\xi} := R_{l_20} \cdot c_l + R'_{2\xi_20} \cdot c_l^2 = 0.95$$

$$X_{к\xi} := X_l \cdot c_l + X'_{2\xi} \cdot c_l^2 = 3.485$$

$$I_k := \frac{U_{l\phi}}{\sqrt{R_{к\xi}^2 + X_{к\xi}^2}} = 60.912 \quad \text{А}$$

Попереднє значення струму короткого замикання з урахуванням насичення:

$$I_{кн} := k_{нсп} \cdot I_k = 79.186 \quad \text{А}$$

Кратність пускового струму:

$$k_{ni} := \frac{I_k}{I_{lн}} = 5.641$$

Коефіцієнт, що враховує зменшення МРС
внаслідок укорочення кроку (з рис. 6.2):

$$k_\beta := 1$$

Середнє значення МРС одного паза статора:

$$F_{ncp} := 0.7 \cdot \frac{I_{KH} \cdot N_{nl\delta}}{a_1} \cdot \left(k_\beta + k_{y1} \cdot k_{obl} \cdot \frac{z_1}{z_2} \right) = 2.347 \times 10^3 \text{ А}$$

$$c_H := 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0.925$$

Фактична індукція в повітряному зазорі:

$$B_{\phi\delta} := \frac{F_{ncp} \cdot 10^{-3}}{1.6 \cdot \delta \cdot c_H} = 5.287 \text{ Тл}$$

З рис. 6.3: $\chi_\delta := 0.45$

$$c_{I_H} := (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \chi_\delta) = 4.443$$

Зменшення коефіцієнта провідності пазового розсіювання через насичення
для напівзакритого паза статора:

$$\Delta\lambda_{I_H} := \frac{h_{u1} + 0.58 \cdot h_{\kappa 1}}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{I_H}}{c_{I_H} + 1.5 \cdot b_{u1}} = 0.138$$

Коефіцієнт провідності пазового розсіювання з урахуванням насичення:

$$\lambda_{nI_H} := \lambda_{nI} - \Delta\lambda_{I_H} = 1.076$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання статора:

$$\lambda_{\partial I_H} := \lambda_{\partial I} \cdot \chi_\delta = 1.334$$

Коефіцієнт сумарної провідності статора і її індуктивний опір:

$$\lambda_{I_H} := \lambda_{nI_H} + \lambda_{\partial I_H} + \lambda_{lI} = 3.211$$

$$X_{I_H} := X_I \cdot \frac{\lambda_{I_H}}{\lambda_I} = 0.973 \text{ Ом}$$

$$c_{2H} := (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \chi_\delta) = 5.698$$

Зміна коефіцієнта провідності пазового розсіювання через насичення:

$$\Delta\lambda_{n2H} := \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{2H}}{c_{2H} + b_{u2}} = 0.264$$

Коефіцієнт провідності пазового розсіювання ротора з урахуванням витіснення
струму і насичення зубців:

$$\lambda_{n2\xi_H} := \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2H} = 1.03$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання ротора:

$$\lambda_{\partial 2H} := \lambda_{\partial 2} \cdot \chi_\delta = 0.973$$

Коефіцієнт сумарної провідності ротора з урахуванням витіснення струму і насичення зубців:

$$\lambda_{2\xi_H} := \lambda_{n2\xi_H} + \lambda_{\partial 2H} + \lambda_{\kappa l} + \lambda_{\kappa k} = 4.419$$

Опори обмотки ротора, що відповідають провідності ротора з урахуванням витіснення струму і насичення зубців:

$$X_{2\xi_H} := X_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi_H}}{\lambda_2} = 2.531 \times 10^{-4} \quad \text{Ом}$$

$$X'_{2\xi_H} := X'_2 \cdot \frac{\lambda_{2\xi_H}}{\lambda_2} = 1.36 \quad \text{Ом}$$

6.3 Пусковий струм і пусковий момент

Опори короткого замикання двигуна:

$$R_{\kappa\xi_H} := c_I \cdot R_{I_20} + c_I^2 \cdot R'_{2\xi_20} = 0.95 \quad \text{Ом}$$

$$X_{\kappa\xi_H} := c_I \cdot X_{I_H} + c_I^2 \cdot X'_{2\xi_H} = 2.454 \quad \text{Ом}$$

$$Z_{\kappa\xi_H} := \sqrt{R_{\kappa\xi_H}^2 + X_{\kappa\xi_H}^2} = 2.632 \quad \text{Ом}$$

Струм короткого замикання (пусковий струм) двигуна:

$$I''_{2\kappa} := \frac{U_{1\phi}}{Z_{\kappa\xi_H}} = 83.59 \quad \text{А}$$

$$I_{\kappa} := I''_{2\kappa} = 83.59$$

Перевірка: $\frac{I_{\kappa H} - I''_{2\kappa}}{I''_{2\kappa}} \cdot 100 = -5.268 < 15 \%$

Кратність пускового струму:

$$k_{ni\partial} := \frac{I_{\kappa}}{I_{I_H}} = 7.741$$

Пусковий момент двигуна:

$$M_n := \frac{p \cdot m_I \cdot U_{1\phi}^2 \cdot c_I^2 \cdot R'_{2\xi_20}}{2 \cdot \pi \cdot f_I \cdot Z_{\kappa\xi_H}^2} = 78.955 \quad \text{Нм}$$

Кратність пускового моменту:

$$k_{mn} := \frac{M_n}{M_{2H}} = 2.2$$

6.4 Максимальний момент

$$\lambda_{n2H} := \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2H} = 1.417$$

$$\lambda_{2H} := \lambda_{n2H} + \lambda_{\partial 2H} + \lambda_{\kappa l} + \lambda_{\kappa k} = 4.807$$

Індуктивний опір обмотки ротора з врахуванням насичення зубців:

$$X'_{2H} := X'_2 \cdot \frac{\lambda_{2H}}{\lambda_2} = 1.48 \quad \text{Ом}$$

Опір короткого замикання двигуна з урахуванням насичення зубців:

$$X_{KH} := c_I \cdot X_{IH} + c_I^2 \cdot X'_{2H} = 2.581 \quad \text{Ом}$$

Критичне ковзання:

$$s_{кр} := \frac{R'_2}{\sqrt{R'^2_1 + X_{KH}^2}} = 0.232$$

Максимальний момент:

$$M_{max} := \frac{p \cdot m_I \cdot U_{1\phi}^2 \cdot \frac{R''_2}{s_{кр}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R'_1 + \frac{R''_2}{s_{кр}} \right)^2 + X_{KH}^2 \right]} = 152.046 \quad \text{Нм}$$

Кратність максимального моменту:

$$k_M := \frac{M_{max}}{M_{2H}} = 4.237$$

7 ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ

7.1 Тепловий розрахунок

Коефіцієнт, який залежить від класу ізоляції обмотки: $m'_m := 1.4$

Втрати в обмотці статора при максимально допустимій температурі:

$$\Delta p_{елH_M} := m_I \cdot I_{IH}^2 \cdot m'_m \cdot R'_1 = 207.563 \quad \text{Вт}$$

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора:

$$S_{cl} := \pi \cdot D_I \cdot l_I = 5.875 \times 10^4 \quad \text{мм}^2$$

Умовний периметр поперечного перерізу:

$$\Pi_I := 2 \cdot h_{nI} + b_1 + b_2 = 45.9 \quad \text{мм}$$

Умовна поверхня охолодження:

- пазів статора:

$$S_{inI} := z_I \cdot \Pi_I \cdot l_I = 2.396 \times 10^5 \quad \text{мм}^2$$

- лобових частин обмотки:

$$S_{лI} := 4 \cdot \pi \cdot D_I \cdot l_{el} = 8.806 \times 10^4 \quad \text{мм}^2$$

Кількість ребер зовнішньої поверхні корпусу:

$$n_p := 1.6 \cdot \sqrt[3]{h} = 7.712$$

Висота ребер зовнішньої поверхні корпусу:

$$h_p := 0.6 \cdot \sqrt[4]{h^3} = 20.657 \quad \text{мм}$$

- лобових частин обмотки:

$$S_{\text{обер}} := (\pi \cdot D_{n1} + 8 \cdot n_p \cdot h_p) \cdot (l_l + 2 \cdot l_{el}) = 4.803 \times 10^5 \quad \text{мм}^2$$

Коефіцієнт, що враховує частину втрат в активній частині статора, яка нагріває повітря всередині двигуна (з табл. 7.1):

$$k := 0.2$$

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки і від втрат в сталі, віднесених до внутрішньої поверхні охолодження активної частини статора:

$$P_{cl} := k \cdot \frac{\Delta p_{el1n_m} \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}} + \Delta p_{ml}}{S_{cl}} = 9.917 \times 10^{-4} \quad \text{Вт/мм}^2$$

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки, віднесених до поверхні охолодження пазів:

$$P_{inl} := \frac{\Delta p_{el1n_m} \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}}}{S_{inl}} = 3.88 \times 10^{-4} \quad \text{Вт/мм}^2$$

Питомий тепловий потік від втрат в лобових частинах обмотки, віднесених до поверхні охолодження цих частин:

$$P_{ll} := \frac{\Delta p_{el1n_m} \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}}}{S_{ll}} = 1.056 \times 10^{-3} \quad \text{Вт/мм}^2$$

Кругова швидкість ротора:

$$v_2 := \pi \cdot D_{n2} \cdot \frac{n_l}{60000} = 10.081 \quad \text{м/с}$$

Коефіцієнт тепловіддачі поверхні статора (з рис. 7.1):

$$\alpha_l := 10 \cdot 10^{-5}$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні активної частини статора над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta t_{nl} := \frac{P_{cl}}{\alpha_l} = 9.917 \quad ^\circ\text{C}$$

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції в пазу з урахуванням повітряних шарів:

$$\lambda_{eke} := 16 \cdot 10^{-5} \quad \text{Вт/(мм*град)}$$

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки, що залежить від відношення діаметрів голого і ізольованого проводу (з рис. 7.2):

$$\lambda'_{eke} := 125 \cdot 10^{-5}$$

Перепад температури в ізоляції паза і котушок з круглих проводів:

$$\Delta t_{inl} := P_{inl} \cdot \left(\frac{b_{il}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_l + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = 0.884 \quad ^\circ\text{C}$$

Перепад температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta t_{лl} := \frac{P_{лl}}{\alpha_l} = 10.558 \quad ^\circ\text{C}$$

Перепад температури в ізоляції лобових частинах котушок з круглих провідників:

$$\Delta t_{il} := P_{лl} \cdot \left(\frac{b_{il}}{\lambda_{екв}} + \frac{h_{nl}}{12 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = 2.761 \quad ^\circ\text{C}$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta t'_l := (\Delta t_{nl} + \Delta t_{inl}) \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}} + (\Delta t_{лl} + \Delta t_{il}) \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}} = 10.804 \quad ^\circ\text{C}$$

$$R''_{2_20} := c_l^2 \cdot R'_{2_20} = 0.498 \quad \text{Ом}$$

$$R''_{2_м} := m'_m \cdot R''_{2_20} = 0.697 \quad \text{Ом}$$

$$\Delta p_{ел2н_м} := m_l \cdot I''_{2н}^2 \cdot R''_{2_м} = 165.609 \quad \text{Вт}$$

Втрати в двигуні, що передаються повітряю всередині двигуна:

$$\Delta p'_\Sigma := k \cdot \left(\Delta p_{ел1н_м} \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}} + \Delta p_{мл} \right) + \Delta p_{ел1н_м} \cdot \frac{2 \cdot l_l}{l_{cp1}} + (\Delta p_{ел2н_м} + 0.1 \cdot \Delta p_{мх} + \Delta p_{дн})$$

Коефіцієнт підігріву повітря (з рис. 7.3): $\alpha_e := 2.4 \cdot 10^{-5} \quad \text{Вт}/(\text{мм}^2 \cdot \text{град})$

Середнє перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою зовнішнього повітря:

$$\Delta t_e := \frac{\Delta p'_\Sigma}{S_{двп} \cdot \alpha_e} = 30.619 \quad ^\circ\text{C}$$

Середнє перевищення температури обмоток над температурою навколишнього повітря:

$$\Delta t_l := \Delta t'_l + \Delta t_e = 41.424 \quad ^\circ\text{C} < 80 \quad ^\circ\text{C}$$

Умова виконується

7.2 Вентиляційний розрахунок

Зовнішній діаметр корпусу:

$$D_{корп} := 2 \cdot (h - h_l) = 214 \quad \text{мм}$$

Коефіцієнт, що враховує зміну тепловіддачі по довжині корпусу двигуна:

$$k_{2\theta} := 2.2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n_l}{1000}\right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{корп}}{100}} = 4.362$$

Теплоємність машини $c_\theta := 1100 \text{ Дж/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^3$

Перевищення температури повітря, що виходить з двигуна, над повітрям, що в нього входить:

$$\Delta t'_\theta := 2 \cdot \Delta t_\theta = 61.239 \text{ }^\circ\text{С}$$

Необхідний розхід повітря:

$$V_\theta := k_{2\theta} \cdot \frac{\Delta p'_\Sigma}{c_\theta \cdot \Delta t'_\theta} = 0.023 \text{ м}^3/\text{с}$$

Розхід повітря, який може бути забезпечений зовнішнім вентилятором:

$$V'_\theta := 0.6 \cdot \left(\frac{n_l}{1000}\right) \cdot \left(\frac{D_{корп}}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} = 0.088 \text{ м}^3/\text{с}$$

Перевірка: $V'_\theta > V_\theta$ Умова виконується

Напір повітря, що розвивається зовнішнім вентилятором:

$$H := 12.3 \cdot \left(\frac{n_l}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{корп}}{100}\right)^2 = 126.74 \text{ Па}$$

8 МАСА ДВИГУНА ТА ДИНАМІЧНИЙ МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ

Наближене значення динамічного моменту інерції:

$$J_{i\partial} := 0.55 \cdot D_{н2}^4 \cdot l_2 \cdot 10^{-12} = 0.022 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Маса ізольованих проводів обмотки статора:

$$m_{MI} := \left[7.55 + 1.35 \cdot \left(\frac{d'}{d}\right)^2 \right] \cdot z_l \cdot \frac{N_{nl\partial}}{2} \cdot l_{cp1} \cdot c \cdot S \cdot 10^{-6} = 9.12 \text{ кг}$$

Кількість лопаток вентилятора (з табл. 8.1): $N_l := 10$

Товщина лопаток вентилятора:

$$b_l := 0.3 \cdot \sqrt{h} = 3.175 \text{ мм}$$

Висота лопаток вентилятора:

$$h_l := 0.83 \cdot \sqrt[3]{h^2} = 19.285 \text{ мм}$$

Довжина лопаток вентилятора:

$$l_l := 0.31 \cdot h = 34.72 \text{ мм}$$

Маса алюмінію короткозамкненого ротора:

$$m_{ал2} := 2.7 \cdot [z_2 \cdot S_{cm} \cdot l_2 + 2 \cdot \pi \cdot D_{кл.ср} \cdot S_{кл} + 1.1 N_l \cdot (l_l - l_{кл}) \cdot h_l \cdot b_l] \cdot 10^{-6} = 1.556 \quad \text{кг}$$

Маса сталі сердечників статора і ротора:

$$m_{c\Sigma} := 7.8 \cdot l_l \cdot k_c \cdot [0.785 \cdot (D_{нл}^2 - D_2^2) - z_l \cdot S_{nl} - z_2 \cdot S_{n2}] \cdot 10^{-6} = 24.617 \quad \text{кг}$$

Середня довжина паза:

$$b_n := 0.5 \cdot (b_l + b_2) = 7.16 \quad \text{мм}$$

Маса ізоляції статора:

$$m_{il} := 1.35 \cdot (l_l + 20) \cdot (2 \cdot h_{nl} + 3 \cdot b_n) \cdot b_{il} \cdot z_l \cdot 10^{-6} = 0.106 \quad \text{кг}$$

Маса конструктивних матеріалів двигуна:

$$m_k := (0.21 \cdot D_{нл}^2 \cdot l_l + 2.2 \cdot D_{нл}^3) \cdot 10^{-6} = 18.002 \quad \text{кг}$$

Маса двигуна:

$$m_{\partial в} := m_{Мл} + m_{ал2} + m_{c\Sigma} + m_{il} + m_k = 53.401 \quad \text{кг}$$

*Навчальне електронне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Михайло Петрович Розводюк
Вадим Сергійович Бомбик
Олексій Анатолійович Жуков**

**Розрахунок і конструювання трифазних
асинхронних двигунів з
короткозамкненим ротором.
Курсове проєктування**

Рукопис оформив *В. Бомбик*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовила *Т. Старічек*

Підписано до видання 29.10.2024 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2024-167.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: irvc.ed.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009.