

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

С.О.Лапкіна

**ПРОЕКТУВАННЯ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ
ДЛЯ ВИСОТИ ВІСІ ОБЕРТАННЯ ДО 355 ММ**

Навчальний посібник

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2026

УДК 621.313.333
Л24

*Рекомендовано до друку вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(протокол № 13 від 26.06.2026 року).*

Рецензенти:

А. В. Чабан - д. т.н., проф., професор кафедри електротехнічних систем Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З.Гжицького.

В. В. Прус - д. т.н., доц., завідувач кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

Л24 Лапкіна С. О. Проектування асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором для висоти вісі обертання до 355 мм: навч. посібник / С. О. Лапкіна. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 149 с.

ISBN 978-617-529-558-8

У навчальному посібнику наведено методику розрахунку асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором серії 4А для висоти вісі обертання до 355 мм напругою до 660 В. Включає питання розрахунку головних розмірів асинхронного двигуна, осердя статора і ротора, повітряного зазору, магнітного ланцюга, втрат потужності, коефіцієнта корисної дії, робочих характеристик і пускових параметрів, теплових та вентиляційних розрахунків. У додатках наведено приклади розрахунків двигуна.

Навчальний посібник присвячений вивченню дисципліни «Електричні машини» і призначене для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності G3 «Електрична інженерія». Посібник рекомендований як керівництво для виконання курсового проекту за темою «Проектування асинхронного двигуна».

УДК 621.313.333

ISBN 978-617-529-558-8

©Лапкіна С.О., 2026
©Національний університет
«Запорізька політехніка», 2026

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень.....	5
Вступ.....	12
1 Електромагнітний розрахунок асинхронного двигуна. Вибір головних розмірів.....	13
2 Розрахунок зубцевої зони і обмотки статора.....	22
2.1 Розрахунок обмотки статора із трапецеїдальними напівзакритими пазами.....	26
2.2 Розрахунок обмотки статора із прямокутними відкритими та напіввідкритими пазами.....	31
3 Розрахунок зубцевої зони і обмотки ротора.....	36
3.1 Розрахунок ротора із овальними напівзакритими та закритими пазами.....	39
3.2 Розрахунок ротора із лопатковими пазами.....	41
3.3 Розрахунок короткозамкненого кільця.....	42
4 Розрахунок магнітного ланцюга.....	44
4.1 МРС повітряного зазору.....	44
4.2 МРС зубцевої зони статора для трапецеїдального пазу.....	45
4.3 МРС зубцевої зони статора для прямокутного пазу.....	48
4.4 МРС зубцевої зони ротора при овальних напівзакритих і закритих пазах.....	50
4.5 МРС зубцевої зони ротора при лопаткових пазах.....	50
4.6 МРС спинки статора.....	52
4.7 МРС спинки ротора.....	52
4.8 Параметри магнітного ланцюга.....	53
5 Активні та індуктивні опори обмоток.....	60
5.1 Опір обмотки статора.....	60
5.2 Опір обмотки ротора з овальними напівзакритими і закритими пазами.....	64
5.3 Опір обмотки ротора з лопатковими пазами.....	67
5.4 Опори обмоток перетвореної схеми заміщення двигуна.....	69

6 Режим неробочого ходу та номінальний режим	71
6.1 Режим неробочого ходу.....	71
6.2 Номінальний режим.....	72
6.3 Побудова робочих характеристик.....	75
6.4 Максимальний момент.....	76
6.5 Початковий пусковий струм та початковий пусковий момент.....	80
6.5.1 Послідовність розрахунку початкового пускового струму та початкового пускового моменту для овального напівзакритого або закритого паза ротора.....	80
6.5.2 Послідовність розрахунку початкового пускового струму та початкового пускового моменту для лопаткового закритого паза ротора.....	84
7 Тепловий та вентиляційний розрахунки.....	88
7.1 Тепловий розрахунок асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.....	88
7.2 Вентиляційний розрахунок асинхронного двигуна.....	93
7.2.1 Порядок розрахунку для асинхронного двигуна із ступенем захисту IP 44, способом охолодження IC0141.....	93
7.2.2 Порядок розрахунку для асинхронного двигуна із ступенем захисту IP23, способом охолодження IC01.....	94
8 Маса двигуна та динамічний момент інерції ротора.....	95
9 Контрольні питання для захисту курсового проекту.....	97
Література.....	100
Додаток А.....	102
Додаток Б.....	107
Додаток В.....	108
Додаток Г Приклад розрахунку асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.....	109
Додаток Д Приклад розрахунку зубцевої зони статора і ротора для асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором типу 4A280M6УЗ.....	140

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

АД	Асинхронний двигун
в.о.	Відносні одиниці
ЕРС	Електрорушійна сила
КЗ	Коротке замикання
ККД	Коефіцієнт корисної дії
НХ	Неробочий хід
МРС	Магніторушійна сила
ПЕТ– 155	Обмотувальний емальований термостійкий провід, призначений для використання при температурах до 155°C
ПЕТ– 200	Обмотувальний емальований термостійкий провід, призначений для використання при температурах до 200°C
ПЕТВ	Обмотувальний емальований термостійкий високоміцний провід
ПЕТВСД	Провід обмотувальний емальований, теплостійкий, високоміцний, із двома шарами обмотки скляними нитками
A_1	Лінійне навантаження статора
A_2	Лінійне навантаження ротора
b_1	Більша ширина паза статора
b_2	Менша ширина паза статора
b_{n1}	Ширина паза статора в штампі
b_{ef}	Припустима ширина ефективного провідника із витковою ізоляцією
$b_{з1}$	Ширина зубця статора
$B_{з1}$	Індукція в зубцях статора
$b_{з2}$	Ширина зубця
$b_{з1min}$	Ширина зубця у найтоншому місці попередньо
$b_{зН2}$	Ширина зубця у нижній частині лопаткового паза ротора
b_{ul}	Товщина корпусної ізоляції
b_c	Припуски на складання осердя статора і ротора по

	висоті
B_{c1}	Індукція в ярмі статора
b_p	Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму
B_{c2}	Магнітна індукція в спинці ротора
b_{cp1}	Середня ширина котушки обмотки статора
$b_{ш1}$	Ширина шліца паза статора
B_δ	Індукція у повітряному зазорі
c	Кількість елементарних провідників
c_a	Кількість елементарних провідників по висоті паза
c_b	Кількість елементарних провідників по ширині паза
$\cos\varphi$	Коефіцієнт потужності
$\cos\varphi_n$	Коефіцієнт потужності для номінального режиму
d	Діаметр неізолюваного проводу
d'	Діаметр ізолюваного проводу
d_κ	Діаметр аксіальних вентиляційних каналів у осерді статора
D_2	Внутрішній діаметр ротора
$D_{\text{клср}}$	Середній діаметр короткозамкненого кільця
$D_{\text{корп}}$	Максимально припустимий зовнішній діаметр корпусу
D_{n1}	Значення діаметра осердя статора
$D_{n1\max}$	Максимальне значення діаметра осердя статора
D_{n2}	Зовнішній діаметр осердя ротора
E	Електрорушійна сила неробочого ходу
f	Частота мережі
F_{31}	Магніторушійна сила зубців статора
F_{32}	Магніторушійна сила зубців ротора
F_{c1}	Магніторушійна сила спинки статора
F_{c2}	Магніторушійна сила спинки ротора
F_δ	Магніторушійна сила повітряного зазору
F_Σ	Сумарна магніторушійна сила магнітного ланцюга на один полюс
h	Висота вісі обертання
H	Напір повітря, що розвивається зовнішнім вентилятором
h_{1p}	Відстань між центрами радіусів пазу ротора

$h_{\text{еф}}$	Припустима висота ефективного провідника із витковою ізоляцією
h_{κ}	Висота клина
$h_{\text{кл}}$	Висота короткозамкненого кільця
$h_{\text{н1}}$	Висота паза статора
$h_{\text{с1}}$	Висота спинки статора
$h_{\text{с2}}$	Висота спинки ротора
$h_{\text{ш1}}$	Висота шліца паза статора
I_0	Струм неробочого ходу
I_1	Номінальний фазний струм статорної обмотки
I_2	Струм стрижня ротора для робочого режиму
$I_{\text{а1}}$	Активна складова струму статора
$I_{\text{кл}}$	Струм у короткозамикальному кільці
$I_{\text{м}}$	Намагнічуючий струм
$I'_{\text{м}}$	Намагнічуючий струм у відносних одиницях
$I''_{\text{м2}}$	Струм ротора, який відповідає максимальному моменту
$I_{\text{п1}}$	Фазний струм статора при пуску
$I''_{\text{п2}}$	Струм ротора при пуску
$I_{\text{па1}}$	Активна складова струму статора при пуску
$I_{\text{пр1}}$	Реактивна складова струму статора при пуску
$I_{\text{са}}$	Активна складова струму статора при синхронному обертанні
$I_{\text{ср}}$	Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні
$I_{\text{ст}}$	Струм в стрижні короткозамкненого ротора
$I_{\text{р1}}$	Реактивна складова струму статора
J_1	Густина струму в обмотці статора
$J_{\text{ід}}$	Значення динамічного моменту інерції короткозамкненого ротора
$J_{\text{ст}}$	Густина струму в стрижні короткозамкненого ротора
k_k	Коефіцієнт, який враховує зменшення магнітного опору повітряного зазору при наявності радіальних каналів на статорі або роторі
$k_{\text{нас}}$	Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга
$k_{\text{об1}}$	Обмотковий коефіцієнт

k_n	Коефіцієнт заповнення пазу
$K_{\text{п}}$	Кратність початкового пускового струму
k_p	Коефіцієнт розподілу
k_y	Коефіцієнт укорочення
k_{δ}	Загальний коефіцієнт повітряного зазору
$k_{\delta 1}$	Коефіцієнт, який враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчастої будови статора
$k_{\delta 2}$	Коефіцієнт, який враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчастої будови ротора
l_1	Конструктивна довжина осердя статора
l'_1	Розрахункова довжина магнітопроводу
$l_{\delta 1}$	Довжина вильота лобової частини обмотки
$l_{\delta 2}$	Вильот лобової частини обмотки ротора
$l_{\kappa 1}$	Довжина вентиляційного каналу
$l_{\text{кл}}$	Довжина короткозамкненого кільця
$l_{\text{л1}}$	Середня довжина однієї лобової частини обмотки статора
l_{n1}	Довжина одного пакета осердя статора
$l_{\delta 1}$	Довжина вильота лобової частини обмотки
$l_{\text{л1}}$	Середня довжина однієї лобової частини котушки
$l_{\text{ср1}}$	Середня довжина витка обмотки
$m_{\text{ал2}}$	Маса алюмінію короткозамкненого ротора
$m_{\text{дв}}$	Повна маса двигуна
$m_{\text{з1}}$	Розрахункова маса сталі зубців статора
m_{i1}	Маса ізоляції статора
m_k	Маса конструкційних матеріалів
$m_{\text{м1}}$	Маса ізованих проводів обмотки статора
$m_{\text{с1}}$	Маса сталі в спинці статора
$m_{\text{сЭ}}$	Маса сталі осердя статора і ротора
n_1	Синхронна частота обертання,
$n_{\kappa 1}$	Кількість аксіальних вентиляційних каналів у осерді статора
N_6	Кількість ефективних провідників по висоті прямокутного пазу статора
N'_{n1}	Кількість ефективних провідників

$N_{ш}$	Кількість ефективних провідників по ширині прямокутного паза статора
p	Кількість пар полюсів
P'	Розрахункова потужність
P_1	Потужність, яка підведена до двигуна
P'_2	Механічна потужність двигуна
P_d	Додаткові втрати при номінальному навантаженні
$P_{\Sigma 1}$	Магнітні втрати в зубцях статора
P_{m1}	Електричні втрати в обмотці статора
P_{m2}	Електричні втрати в обмотці ротора
$P_{mx\Sigma}$	Механічні втрати
P_{c1}	Магнітні втрати в спинці статора
P_{cm1}	Електричні втрати в обмотці статора при синхронному обертанні
$P_{c\Sigma}$	Сумарні магнітні втрати в осерді статора
P_{Σ}	Сумарні втрати
q_1	Кількість пазів на полюс і фазу статора
q_2	Кількість пазів ротора на полюс та фазу ротора
r_1	Активний опір обмотки фази статора при 20 °С
r'_1	Активний опір обмотки фази статора при 20 °С у відносних одиницях
r_{1p}	Більший радіус пазу ротора
r'_2	Активний опір обмотки ротора при 20°С, приведене до обмотки статора
r'_{2*}	Активний опір обмотки ротора при 20°С, приведене до обмотки статора в умовних одиницях
r_{2p}	Менший радіус пазу ротора
r_k	Активний опір короткого замикання
$r_{кл}$	Опір короткозамкнених кілець приведений до струму стрижня при 20°С
R_m	Еквівалентний опір схеми заміщення при максимальному моменті
R_n	Еквівалентний опір схеми заміщення
$r_{ст}$	Активні опори стрижня клітки при 20°С
$r_{ств}$	Активний опір верхньої частини стрижня лопаткового паза при 20°С
$r_{стн}$	Активний опір нижньої частини стрижня

	лопаткового паза при 20°C
S_{ef}	Площа ефективного провідника
S_u	Площа поперечного перетину корпусної ізоляції у пазу статора
$S_{кл}$	Площа поперечного перетину короткозамкненого кільця
S_m	Ковзання при максимальному моменті
S_n	Ковзання для номінального режиму
S_{n1}	Площа поперечного перетину паза статора в світі
S''_{n1}	Площа поперечного перетину пазу статора, яку займає обмотка
S_{np}	Площа поперечного перетину прокладок між верхньою та нижньою котушками у пазу статора та під клином
S_p	Площа поперечного перетину стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму
$S_{ст}$	Площа поперечного перетину паза в штампі
$S_{ств}$	Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня лопаткового паза ротора
$S_{стн}$	Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня лопаткового паза ротора
t_1	Зубцевий поділ по внутрішньому діаметру статора
t_{1min}	Зубцева поділка статора у вузькому місці
t_2	Зубцевий поділ по зовнішньому діаметру ротора
t_{cp1}	Середній зубцевий поділ статора
U_1	Напруга в обмотці фази статора
V_v	Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна
w_1	Кількість витків в обмотці фази статора
x_1	Індуктивний опір обмотки фази статора
x'_1	Індуктивний опір обмотки фази статора у відносних одиницях
x_2	Індуктивний опір обмотки ротора
x'_2	Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора
x'_{2*}	Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора у відносних одиницях

x_k	Індуктивний опір короткого замикання
$x_{\text{кп}}$	Індуктивний опір схеми заміщення при пуску
$x_{\text{м}}$	Головний індуктивний опір
$x'_{\text{м}}$	Головний індуктивний опір у відносних одиницях
$y_{\text{п1}}$	Крок секції
z_1	Кількість пазів осердя статора
z_2	Кількість пазів ротора
z_k	Повний опір короткого замикання
$z_{\text{м}}$	Повний опір схеми заміщення при максимальному моменті
$z_{\text{н}}$	Повний опір схеми заміщення
$z_{\text{кп}}$	Повний опір схеми заміщення при пуску
z_{∞}	Повний опір схеми заміщення при нескінченно великому ковзанні
Φ	Магнітний потік
$\alpha_{\text{ск}}$	Центральний кут скосу пазів
$\beta_{\text{ск1}}$	Коефіцієнт скосу у долях зубцевої поділки
$\beta_{\text{ск2}}$	Відносний скос пазів ротора, у долях зубцевого поділу ротора
δ	Повітряний зазор
η	Коефіцієнт корисної дії
λ_1	Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора
λ_2	Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора
$\lambda_{\text{д1}}$	Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання статора
$\lambda_{\text{д2}}$	Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання ротора
$\lambda_{\text{кл}}$	Коефіцієнт провідності розсіювання короткозамкнених кілець
$\lambda_{\text{л1}}$	Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки статора
$\lambda_{\text{п1}}$	Коефіцієнт провідності розсіювання для паза статора
$\lambda_{\text{п2}}$	Коефіцієнт провідності розсіювання для паза ротора
$\lambda_{\text{п2п}}$	Коефіцієнт провідності розсіювання паза ротора при пуску
$\lambda_{\text{ск}}$	Коефіцієнт провідності розсіювання скосу пазів ротора

ВСТУП

Широке впровадження асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором у виробничі та побутові цикли обумовлене їхньою конструктивною надійністю та мінімальними витратами на обслуговування. Статистично ці електроприводи генерують понад 70% сумарного електричного навантаження в індустріальному сегменті, що підтверджує їх статус фундаментального елемента сучасних систем електроспоживання.

У навчальному посібнику наведено класичну схему розрахунку асинхронних двигунів низької та середньої потужності з висотою осі обертання до 355 мм. Представлена методика є систематизованою та скомбінованою на основі аналізу джерел [1–6], а також доповнена сучасними алгоритмами перевірочних розрахунків і адаптована для реалізації цифрових моделей у середовищі Mathcad. Структура посібника спрямована на вибудовування чіткої логічної кореляції між фундаментальною теорією та прикладним обчисленням параметрів асинхронних машин. Це сприяє глибшому розумінню взаємозалежностей між конструктивними особливостями та електрофізичними показниками технічних пристроїв.

У посібнику наведено поетапний розрахунок основних електричних і фізичних параметрів асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором, який включає розрахунок зубцевої зони статора і ротора, обмотки статора, параметрів магнітного ланцюга, параметрів у режимі неробочого ходу та номінальному, максимального моменту, пускового струму і моменту, а також тепловий, вентиляційний і масогабаритний розрахунок.

Даний посібник дозволить студентам найбільш детально вивчити конструкцію, спроектувати і розрахувати асинхронний двигун серії 4А.

1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. ВИБІР ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

У даному навчальному посібнику розглядається проектування асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором. У залежності від ступеня захисту і способу охолодження [18, 19] розрізняють:

- IP44 – закрите виконання, яке забезпечує захист від потрапляння твердих предметів розміром більше 1,0 мм і бризок води спрямованих під будь-яким кутом до корпусу, з обдуванням від вентилятора (IC0141), який розміщено на валу двигуна;

- IP23 – захисне виконання, яке забезпечує захист від потрапляння твердих предметів розміром більше 12,5 мм і бризок води спрямованих під кутом 60° від вертикалі, із самовентиляцією (IC01).

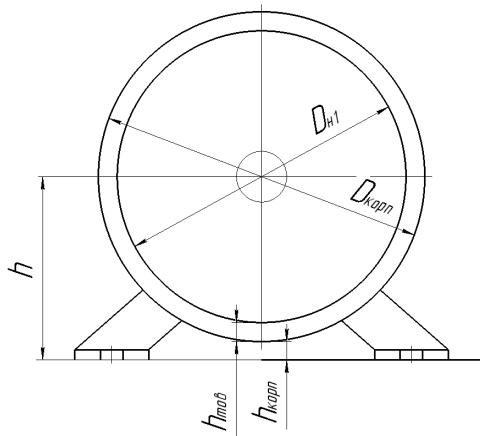


Рисунок 1.1 – Головні розміри асинхронного двигуна

Розрахунок асинхронних машин починають з визначення основних розмірів: внутрішнього діаметра статора D_{st} та розрахункової довжини повітряного зазору l'_1 . Попередньо потрібно визначити кількість пар полюсів p .

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1}, \quad (1.1)$$

де f – частота мережі, Гц,

n_1 – синхронна частота обертання, об/хв.

Гранично-припустиме значення діаметра осердя статора D_{n1max} визначається за висотою осі обертання h . Максимальне значення діаметра осердя статора D_{n1max} і рекомендоване значення діаметра осердя статора D_{n1} наведено у табл. 1.1 за [9], при цьому вибір має забезпечити виконання умови: $D_{n1} \leq D_{n1max}$.

Таблиця 1.1 – Гранично припустимі значення діаметра осердя

h , мм	D_{n1max} , мм	D_{n1} , мм	$h_{мов}$, мм	$h_{корп}$, мм	Припуски на штампування, мм
50	86	81	4	3	4
56	96	89	4	4	4
63	108	100	5	4	5
71	122	110, 116	6	4	5
80	139	116, 131	6,5	4	6
90	157	149	6,5	5	6
100	175	168	7,5	5	7
112	197	191	8,5	5	7
132	233	225	9,5	6	7
160	285	272	11,5	6	7
180	322	313	12	7	7
200	359	349	13,5	7	8
225	406	392	15	7	8
250	452	437	16	8	8
280	520	520	12	8	10
315	590	520, 590	13	7	10
355	660	590, 660	15	10	10

Внутрішній діаметр осердя статора визначається у залежності від кількості пар полюсів і зовнішнього діаметра осердя статора за табл. 1.2.

Розрахункова потужність, Вт

$$P' = \frac{k_n \cdot P_2}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (1.2)$$

де k_n – коефіцієнт, знаходять за рис. 1.2.

Таблиця 1.2 – Внутрішній діаметр осердя статора

2р	D_{H1} , мм	Формула
2	80– 360	$D_1 = (0.5 \dots 0.59) \cdot D_{H1}$
	361– 750	$D_1 = 0.53 \cdot D_{H1}$
4	80– 130	$D_1 = (0.57 \dots 0.62) \cdot D_{H1}$
	131– 590	$D_1 = (0.62 \dots 0.68) \cdot D_{H1}$
6,8	80– 224	$D_1 = (0.65 \dots 0.69) \cdot D_{H1}$
	225– 660	$D_1 = (0.7 \dots 0.74) \cdot D_{H1}$
10, 12	390– 660	$D_1 = (0.72 \dots 0.77) \cdot D_{H1}$

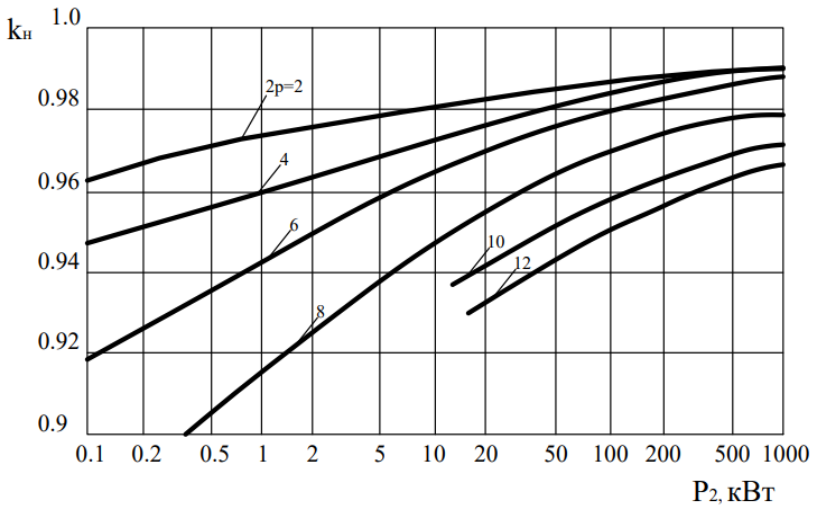


Рисунок 1.2 – Значення коефіцієнта k_n у залежності від кількості пар полюсів і номінальної потужності, що віддається

Електромагнітні навантаження A'_1 та значення індукції B'_δ у повітряному зазорі обирають за рис. 1.3, 1.4 у відповідності до типу обмотки, ступеня захисту і способу охолодження

асинхронного двигуна. На рисунках 1.3 та 1.4 наведені значення A_1 та B_δ наведені для асинхронного двигуна при $2p=4$ та ізоляції класу нагрівостійкості F [17]. Якщо кількість пар полюсів чисельно відрізняється від $2 \cdot p=4$ необхідно ввести корегуючий коефіцієнт за таблицею 1.3 [4].

Таблиця 1.3 – Корегуючі коефіцієнти для визначення електромагнітних навантажень та індукції у повітряному зазорі

Корегуючі коефіцієнти	Ступінь захисту, спосіб охолодження	D_{nl} , мм	$2p=2$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$ $2p=12$
k_1 (для A_1)	IP44, IC0141	80–250	0,93	1,0	1,0	–
		251–500	1,1	0,93	0,93	–
		500–700	1,1	0,915	0,915	0,84
	IP23, IC01	251–500	1,16	0,9	0,9	0,72
		500–700	1,15	0,89	0,84	0,72
k_2 (для B_δ)	IP44, IC0141	80–250	1,0	1,0	1,0	1,04
		251–700	0,96	1,04	1,04	0,92
	IP23, IC01	250–700	0,98	1,02	1,02	1,04

Для двигунів із висотою вісі обертання 50–132 мм передбачається використання ізоляції класу нагрівостійкості B, що пояснюється низьким перевищенням температур активних частин при забезпеченні оптимальних пускових та енергетичних характеристик. Для двигунів із висотою вісі обертання 160–355 мм рекомендоване використання ізоляції класу нагрівостійкості F [17].

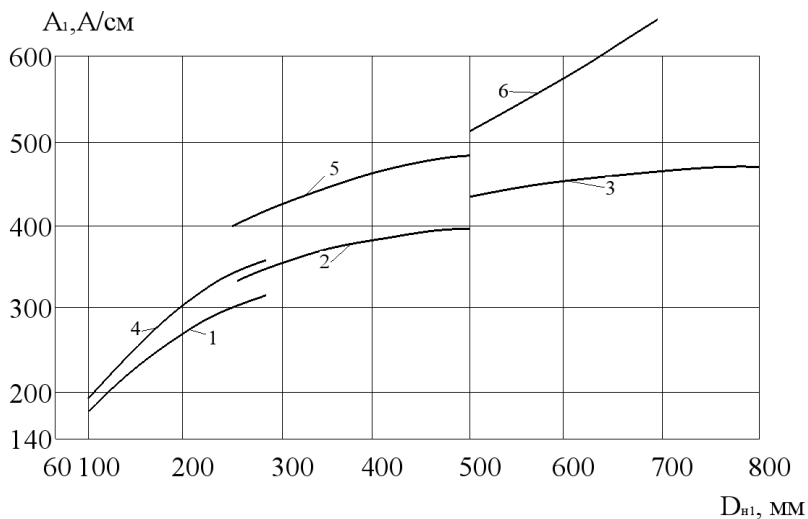


Рисунок 1.3 – Визначення електромагнітних навантажень за зовнішнім діаметром осердя статора

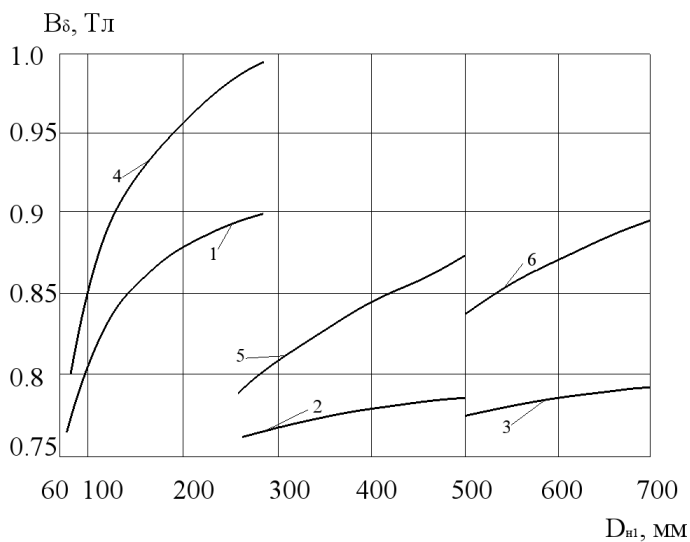


Рисунок 1.4 – Визначення індукції у повітряному зазорі за зовнішнім діаметром осердя статора

Позначення на рисунках 1.3 та 1.4:

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

2 – виконання за захистом IP44, спосіб охолодження IC0141, напівзакриті пази двошарова обмотка;

3 – виконання за захистом IP44, спосіб охолодження IC0141, напівзакриті пази двошарова обмотка, ротор продувається;

4 – виконання за захистом IP23, спосіб охолодження IC01, напівзакриті пази, одношарова обмотка;

5 – виконання за захистом IP23, спосіб охолодження IC01, напівзакриті пази, двошарова обмотка;

6 – виконання за захистом IP23, спосіб охолодження IC01, напівзакриті пази, двошарова обмотка.

При виконанні електродвигунів із класом нагрівостійкості В вводимо додатково корегуючий коефіцієнт для A_1 $k_3=0,86$; при класі нагрівостійкості Н $k_3=1,14$.

Обмотковий коефіцієнт для $2p=2$ приймається $k'_{об} = 0,79$; для $2p \geq 4$ – $k'_{об} = 0,91 \dots 0,94$.

Розрахункова довжина магнітопроводу, мм

$$l'_1 = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A'_1 \cdot B'_\delta \cdot k'_{об}}, \quad (1.3)$$

Конструктивна довжина осердя при відсутності радіальних вентиляційних каналів l_1 дорівнює розрахунковій довжині l'_1 , яка має бути округленою до найближчого цілого числа при $l'_1 < 100$ мм, та до найближчого цілого числа кратного п'яти при $l'_1 > 100$ мм.

Якщо l_1 більша за 300– 350 мм, то застосовують радіальні вентиляційні канали. Кількість вентиляційних каналів n_{k1} визначається довжиною одного пакета l_{n1} (від 55 до 75 мм) осердя статора та довжиною вентиляційного каналу $l_{k1} = 10$ мм. Якщо конструктивне виконання осердя не передбачає наявності радіальних вентиляційних каналів, то довжина осердя статора та ротора дорівнюють довжині вентиляційного каналу.

Якщо радіальні вентиляційні канали передбачені, то конструктивна довжина осердя статора, мм

$$l_1 = l'_1 + n_{k1} \cdot l_{k1}. \quad (1.4)$$

Радіальні вентиляційні канали у осерді ротора виконують при $l_2 > 350$ мм. Кількість та ширину радіальних вентиляційних каналів у осерді ротора приймають такими ж, як і у осерді статора.

Довжину осердя ротора l_2 для $h \leq 250$ мм приймають $l_2 = l_1$; при $h > 250$ мм приймають $l_2 = l_1 + 5$ мм.

При габариті двигуна більше 180 мм у осерді ротора передбачають один ряд аксіальних вентиляційних каналів (табл.1.4) [4, 5].

Відношення, яке дозволяє оцінити правильність обраних геометричних розмірів осердя

$$\lambda = \frac{l_1}{D_1}. \quad (1.5)$$

Таблиця 1.4 – Рекомендації до розміщення аксіальних вентиляційних каналів у осерді статора

h , мм	$2p$	IP44		IP23	
		n_{k1}	d_k	n_{k1}	d_k
180	2	–	–	–	–
	4, 6, 8	10	18	10	18
200	2	12	12	12	12
	4	12	16	12	16
	6, 8	12	22	12	22
225	2	12	12	12	12
	4	12	20	12	20
	6, 8	12	25	12	25
250	2	12	15	12	15
	4	10	25	10	25
	6, 8	10	30	10	30
280, 315	2	12	20	–	–
	4	12	32	12	26
	6, 8, 10	12	32	12	40
355	2	12	20	–	–
	4, 6, 8, 10, 12	12	40	12	40

Отримане значення λ необхідно порівняти із значенням $\lambda_{\text{макс}}$, визначеним за табл. 1.5 із урахуванням поправочного коефіцієнту

k_{nk} за табл. 1.6. Доцільно обирати таке значення λ , яке буде наближеним до $\lambda_{\text{макс}}$. Якщо $\lambda > \lambda_{\text{макс}}$, то необхідно обрати більшу стандартну висоту осі обертання і повторити розрахунок головних розмірів.

Таблиця 1.5 – Розрахункові формули для визначення $\lambda_{\text{макс}}$

Ступінь захисту, спосіб охолодження	D_{H1} , мм	Формула
IP44, IC0141	80– 700	$\lambda_{\text{макс}} = (1,46 - 0,00071 \cdot D_{H1}) \cdot k_{nk}$
IP23, IC01	250– 700	$\lambda_{\text{макс}} = (1,33 - 0,00087 \cdot D_{H1}) \cdot k_{nk}$

Таблиця 1.6 – Значення коефіцієнта k_{nk}

D_{H1} , мм	k_{nk}			
	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8; 10; 12
80– 700	0.95	1	1,05	1,1

Продуктивність двигуна та його економічна доцільність критично залежать від повітряного зазору між статором і ротором (δ). Розширений повітряний зазор призводить до збільшення струму намагнічування статора, що негативно впливає на ККД двигуна. Зменшення зазору, навпаки, посилює додаткові втрати, що призводить до негативного впливу на ефективність. З точки зору механічної надійності, будь-яке відхилення від ідеально концентричного зазору може призвести до асиметричного навантаження на підшипники та вал, що створює неприйнятний ризик удару ротора об статор. Повітряний зазор для двигуна слід обирати згідно до рекомендацій табл. 1.7.

Зовнішній діаметр осердя ротора, мм

$$D_{H2} = D_1 - 2 \cdot \delta. \quad (1.6)$$

Внутрішній діаметр ротора при $h < 71$ мм, мм

$$D_2 = 0,19 \cdot D_{H1}. \quad (1.7)$$

Внутрішній діаметр ротора при $h \geq 71$ мм, мм

$$D_2 = 0,23 \cdot D_{H1}. \quad (1.8)$$

Таблиця 1.7 – Середні рекомендовані значення повітряного зазору δ , мм

h, мм	2р			h, мм	2р			
	2	4	6 і 8		2	4	6 і 8	10 і 12
50	0,25	0,25	0,25	160	0,8	0,5	0,5	–
56	0,3	0,25	0,25	180	1,0	0,6	0,45	–
63	0,35	0,25	0,25	200	1,0	0,7	0,5	–
71, 80	0,35	0,25	0,25	225	1,0	0,85	0,6	–
90	0,4	0,25	0,25	250	1,2	1,0	0,7	–
100	0,45	0,3	0,3	280	1,3	1,0	0,8	0,7
112	0,5	0,3	0,3	315	1,5	1,0	0,9	0,8
132	0,6	0,35	0,35	355	1,8	1,2	1,0	0,9

2 РОЗРАХУНОК ЗУБЦЕВОЇ ЗОНИ І ОБМОТКИ СТАТОРА

Конструкція статора є шихтованою і складається з ізольованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. З листів виштамповують пластини необхідної конфігурації і збирають у осердя статора. Листи штампують у формі кілець з пазами на внутрішній стороні. Пакет листів збирають усередині корпусу двигуна. Для запобігання розходження листів і виникнення магнітної вібрації, їх стягують спеціальними скобами, шпильками або фіксують зварюванням по зовнішній стороні. Рекомендовано використання холоднокатаної ізотропної електротехнічної сталі:

- для $h = 50...250$ мм використовують сталь марки 2013, коефіцієнт заповнення сталі $k_c = 0,97$;

- для $h = 280...355$ мм використовують сталь марки 2312, $k_c = 0,95$.

Форма пазів статора визначається умовами електричної і механічної міцності та визначається у відповідності до рекомендацій, наведених у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Форма паза і тип обмотки статора

h, мм	Форма паза	Тип обмотки
50– 160	Трапецеїдальні напівзакриті	Одношарова всипна концентрична
180– 250		Двошарова або одношарова всипна концентрична
280– 315 (2p=10;12)		Двошарова або одношарова всипна концентрична
280– 315 (2p=2;4; 6; 8)	Прямокутні напіввідкриті	Двошарова із жорстких катушок
355 (2p=10;12)	Прямокутні напіввідкриті	

Одношарову обмотку переважно використовують для асинхронних машин відносно невеликої потужності із $h \leq 160$ мм і виконують із діаметральним кроком $\beta_1 = 1$. Двошарову обмотку виконують із скороченим кроком, при цьому покращується форма кривої поля і зменшуються витрати міді на лобові частини обмотки. Скорочення кроку обирають таким чином, щоб крок секції $y_{п1}$ був цілим числом. Для $2 \cdot p = 2$ приймається $\beta_1 \approx 0,6$, для $2 \cdot p \geq 4$ приймається $\beta_1 \approx 0,8$.

У табл. 2.2 наводяться рекомендації щодо вибору кількості пазів на полюс і фазу q_1 . Дрібне значення q_1 зазвичай обирається для двигунів із різною кількістю полюсів або для тихохідних двигунів. Кількість пазів осердя статора

$$z_1 = 2 \cdot p \cdot m \cdot q_1. \quad (2.1)$$

Крок секції

$$y_{п1} = \frac{z_1 \cdot \beta_1}{2 \cdot p}. \quad (2.2)$$

Таблиця 2.2— Кількість пазів на полюс і фазу q_1

$2p$	h , мм		
	50– 132	160– 225	250– 355
2	3; 4	5; 6	7; 8
4	2; 3	3; 4	4; 5
6	2; 3	3; 4	4; 5
8	1,5; 2	2; 3	3; 4
10	—	—	2; 3
12	—	—	2; 2,5

При дрібному значенні необхідно обрати ціле та перерахувати значення β_1 . Коефіцієнт розподілу

$$k_p = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin(\frac{\pi}{6 \cdot q_1})}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт укорочення

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta_1\right). \quad (2.4)$$

Обмотковий коефіцієнт

$$k_{об1} = k_p \cdot k_y. \quad (2.5)$$

Попереднє значення магнітного потоку, Вб

$$\Phi' = B'_{\delta} \cdot D_1 \cdot l'_1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{p}. \quad (2.6)$$

Кількість витків в обмотці фази

$$w_1 = \frac{k_n \cdot U_1}{222 \cdot k_{об1} \cdot \Phi'}. \quad (2.7)$$

Для визначення кількості ефективних провідників необхідно прийняти кількість паралельних гілок a_1 , яка буде пропорційною значенню кількості пар полюсів, а також при умові, що кількість ефективних провідників $N'_{п1}$ буде максимально наближена до цілого числа. Кількість ефективних провідників

$$N'_{п1} = \frac{w_1 \cdot a_1}{p \cdot q_1}. \quad (2.8)$$

Ефективна робота асинхронної машини можлива при виконанні умов магнітної симетрії. Паралельні гілки обмотки повинні мати однакову кількість витків, сторони котушок мають бути розташовані у магнітному полі симетрично і в однакових умовах. При малому значенні кількості провідників у пазу виникають складнощі із розташуванням провідників у пазах, таким чином є необхідність підвищення a_1 . Отримане за (2.7) значення $N'_{п1}$ необхідно округлити до найближчого цілого числа. При двошаровій обмотці як правило значення $N'_{п1}$ обирають парним, але інколи допустимо і непарне значення. При непарному $N'_{п1}$ котушки мають різну кількість провідників. У такому випадку необхідно звернути увагу на необхідність утворення симетричних паралельних гілок. Після уточнення $N'_{п1}$ необхідно перерахувати значення за (2.8)– (2.13). Уточнюємо кількість витків в обмотці фази

$$w_1 = \frac{N'_{п1} \cdot q_1 \cdot p}{a_1}. \quad (2.9)$$

Магнітний потік, Вб

$$\Phi = \frac{\Phi' \cdot w'_1}{w_1}. \quad (2.10)$$

Індукція у повітряному зазорі, Тл

$$B_{\delta} = \frac{B'_{\delta} \cdot w'_1}{w_1}. \quad (2.11)$$

Відхилення від попередньо визначеного значення індукції у повітряному зазорі має бути у межах $\pm 10\%$

$$\frac{B_{\delta} - B'_{\delta}}{B_{\delta}} \cdot 100\%. \quad (2.12)$$

Значення номінального фазного струму, А

$$I_1 = \frac{P_2}{3 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}. \quad (2.13)$$

Лінійне навантаження статора, А/см

$$A_1 = \frac{10 \cdot N'_{\text{п1}} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1}. \quad (2.14)$$

Відхилення від попередньо визначеного значення лінійного навантаження статора має бути у межах $\pm 10\%$

$$\frac{A_1 - A'_1}{A'_1} \cdot 100\%. \quad (2.15)$$

Припустима індукція в зубцях B_{31} та ярмі статора B_{c1} визначається за табл.2.3 [3, 4].

Таблиця 2.3– Припустима індукція в зубцях та ярмі статора

h, мм	2р	B_{c1} , Тл	h, мм	2р	B_{31} , Тл	
					IP44	IP23
50– 250	2; 4	1,55– 1,75	50– 132	2; 4; 6; 8	1,75– 1,95	1,8– 2,0
	6	1,4– 1,6				
	8	1,1– 1,3				
280– 355	2; 4; 6; 8	1,45– 1,65	160– 250	2	1,75– 1,95	1,9– 2,1
	10; 12	1,2– 1,4	280– 315	4; 6; 8	1,6– 1,8	1,7– 1,9
				10; 12	1,6– 1,8	1,7– 1,9

Зубцевий поділ по внутрішньому діаметру статора, мм

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

2.1 Розрахунок обмотки статора із трапецеїдальними напівзакритими пазами

Для асинхронних двигунів з висотою осі обертання від 50 до 250 мм виконують трапецеїдальні напівзакриті пази статора (рис.2.1). Розміри паза мають забезпечити постійність магнітної індукції у зубцях статора, для цього стінки зубця мають бути паралельними.

У асинхронних двигунів із $h \leq 160$ мм укладання одношарової всипної обмотки виконується автоматизованим способом, а також виконують скос пазів зазвичай на одну зубцеву поділку, що дозволяє зменшити вищі гармоніки ЕРС, покращити пускові характеристики та зменшити рівень шуму. У машин із $h \geq 180$ мм двошарову всипну обмотку виконують як автоматизованим способом, так і вручну, скос пазів не роблять. Концентричні котушки виготовляють із проводів круглого поперечного перетину необхідного класу нагрівостійкості.

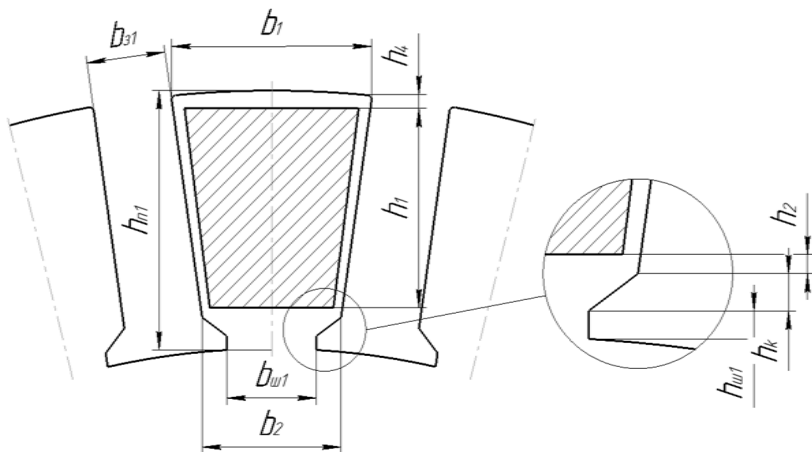


Рисунок 2.1 – Розміри трапецеїдального напівзакритого паза статора

За табл. 2.3 обирають рекомендоване значення магнітної індукції у зубцях B_{s1} і у ярмі B_{c1} статора.

Ширина зубця, мм

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

Висота спинки статора, мм

$$h_{с1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{с1}}. \quad (2.18)$$

Висота паза, мм

$$h_{п1} = \frac{D_{H1} - D_1}{2} - h_{с1}. \quad (2.19)$$

Ширина шліца паза повинна забезпечувати достатню технологічність укладання обмотки. Попереднє значення ширини шліца паза, мм

$$b'_{ш1} = 0,3 \cdot \sqrt{h}. \quad (2.20)$$

Більша ширина паза, мм

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{п1})}{z_1} - b_{з1}. \quad (2.21)$$

Менша ширина паза, мм

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{ш1} - b_{ш1}) - z_1 \cdot b_{з1}}{z_1 - \pi}, \quad (2.22)$$

де $h_{ш1}$ – висота шліца, $h_{ш1} = 0,5$ мм.

Середнє значення односторонньої товщини корпусної ізоляції $b_{и1}$, а також припуски на збирання статора та ротора b_c, h_c обираються у залежності від висоти осі обертання за таблицею 2.4 [6].

Таблиця 2.4 – Припуски на складання осердя статора і ротора h_c, b_c , товщина корпусної ізоляції $b_{и1}$

h , мм	h_c , мм	b_c , мм	$b_{и1}$, мм
50– 80	0,1	0,1	0,2
90– 132	0,1	0,1	0,25
160– 250	0,2	0,2	0,4
280– 355	0,3	0,3	0,58

Правильність визначення попередніх розмірів зубцевої зони і пазу перевіряються виразом

$$z_1 \cdot (b_1 - b_2) + \pi \cdot (b_2 - b_{ш1}) - 2 \cdot \pi \cdot (h_{п1} - h_{ш1}) \approx 0. \quad (2.23)$$

Площа поперечного перетину пазу в штампі, мм²

$$s'_{п1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left(h_{п1} - h_{ш1} - \frac{b_2 - b_{ш1}}{2} \right). \quad (2.24)$$

Площа поперечного перетину паза в світі, мм²

$$s_{п1} = \left(\frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left(h_{п1} - h_{ш1} - \frac{b_2 - b_{ш1}}{2} - h_c \right). \quad (2.25)$$

Площа поперечного перетину корпусної ізоляції, мм²

$$s_{и} = b_{и1} \cdot (2 \cdot h_{п1} + b_1 + b_2). \quad (2.26)$$

Площа поперечного перетину прокладок між верхньою та нижньою котушками у пазу та під клином, мм²

$$s_{пр} = 0,5 \cdot b_1 + 0,75 \cdot b_2. \quad (2.27)$$

Площа поперечного перетину пазу, яку займає обмотка, мм²

$$S''_{п1} = s_{п1} - s_{и} - s_{пр}. \quad (2.28)$$

Максимально допустиме значення коефіцієнта заповнення пазу при ручному укладанні обмотки $k_{п} = 0,75$, при машинному укладанні обмотки $k_{п} = 0,72$. Необхідний перетин проводу визначається виразом (2.28).

$$c \cdot (d'')^2 = \frac{k_{п} \cdot S''_{п1}}{N'_{п1}}. \quad (2.29)$$

Необхідно обрати значення паралельних гілокс таким чином, щоб діаметр ізольованого провідника d' при ручній укладці не перевищував 1,71 мм, при машинній укладці – 1,33 мм. Для обмоток статора із трапецеїдальною формою паза використовують проводи круглого поперечного перетину марок ПЕТВ (клас нагрівостійкості В) [17], ПЕТ–155 (клас нагрівостійкості F) та ПЕТ– 200 (клас нагрівостійкості Н). Для механічного укладання проводу в пази використовують дроти із більш міцною ізоляцією марок ПЕТВМ, ПЕТМ– 155, ПЕТМ– 200 [10-12]. Орієнтовне значення діаметру неізольованого провідника

$$d'' = \sqrt{\frac{k_{п} \cdot S''_{п1}}{N'_{п1} \cdot c}}. \quad (2.30)$$

За значенням d'' обираємо діаметр неізольованого проводу d , діаметр ізольованого проводу d' та площу поперечного перетину

провідника $S''_{п1}$ із переліку стандартизованих провідників. Розміри круглого проводу наведені у додатку А.

Коефіцієнт заповнення пазу

$$k_{п} = \frac{N'_{п1} \cdot c \cdot d'^2}{S''_{п1}}. \quad (2.31)$$

Уточнюємо значення ширини шліца, мм

$$b''_{ш1} = d' + 2 \cdot b_{ш1} + 0,4. \quad (2.32)$$

Серед розрахованих значень ширини шліца $b'_{ш1}$ і $b''_{ш1}$ обираємо більше значення.

Густина струму в обмотці статора, А/мм²

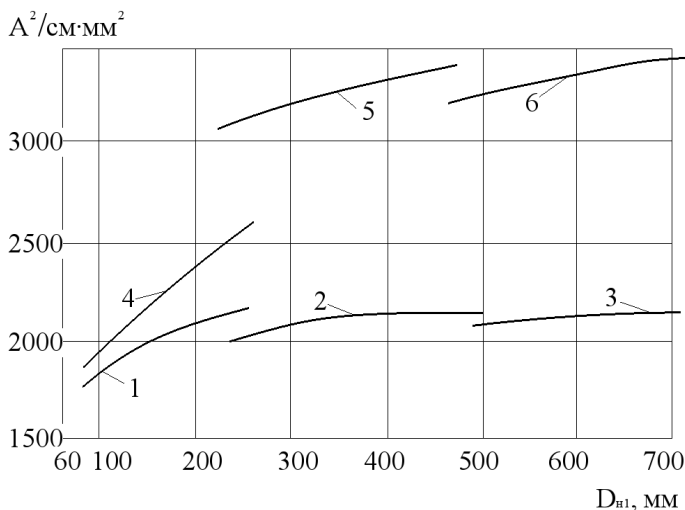
$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1}. \quad (2.33)$$

Правильність розрахунку перевіряємо за добутком лінійного навантаження на густина струму, розраховане значення має збігатись із точністю у 15% із рис. 2.2. Рисунок 2.2 відповідає класу нагрівостійкості ізоляції F із синхронною частотою обертання 1500 об/хв.

Значення з рис. 2.2 при класі ізоляції В необхідно помножити на 0,75, при класі ізоляції Н – на 1,3, а також у залежності від кількості пар полюсів на коефіцієнт $k_{пр}$, визначений із табл. 2.5. Якщо отримане значення при розрахунку двигуна перевищує припустиме більше ніж на 15%, то необхідно або підвищити площі поперечного перетину проводу та пазу за умови дотримання припустимих меж індукції, або збільшити осердя статора та ротора.

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнта $k_{пр}$

Ступінь захисту	$D_{н1}$, мм	$2p$				
		2	4	6	8	10; 12
IP44	80– 240	0,78	1,0	1,0	1,0	–
	280– 500	1,0	1,0	1,0	1,0	–
	520– 660	1,0	1,0	0,87	0,87	0,84
IP23	280– 500	1,07	1,0	0,89	0,84	–
	520– 660	1,0	1,0	0,86	0,75	0,66



1 – IP44, IC0141, напівзакриті пази, одношарова обмотка; 2 – IP44, IC0141, напівзакриті пази, двошарова обмотка; 3 – IP44, IC0141, напіввідкриті пази, двошарова обмотка, ротор продувається; 4 – IP23, IC01, напівзакриті пази, одношарова обмотка; 5 – IP23, IC01, напівзакриті пази, двошарова обмотка; 6 – IP23, IC01, напіввідкриті пази, двошарова обмотка

Рисунок 2.2 – Середні припустимі значення добутку лінійного навантаження на густину струму

Середній зубцевий поділ статора, мм

$$t_{cp1} = \pi \cdot (D_1 + h_{п1}) / z_1. \quad (2.34)$$

Середня ширина котушки обмотки статора, мм

$$b_{cp1} = t_{cp1} \cdot y_{п1}. \quad (2.35)$$

Середня довжина однієї лобової частини котушки, мм

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 15. \quad (2.36)$$

Середня довжина витка обмотки, мм

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_{л1} + l_1). \quad (2.37)$$

Довжина вильота лобової частини обмотки, мм:

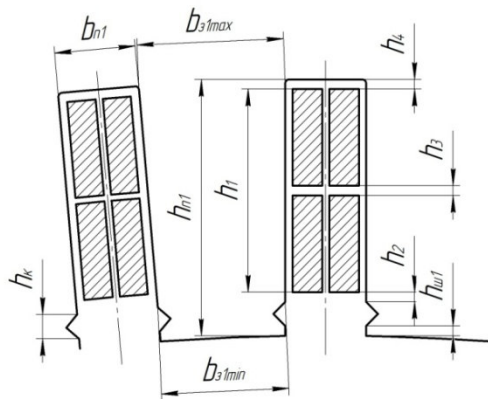
– при $h \leq 132$ мм

$$l_{в1} = (0,19 + 0,1 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 10, \quad (2.38)$$

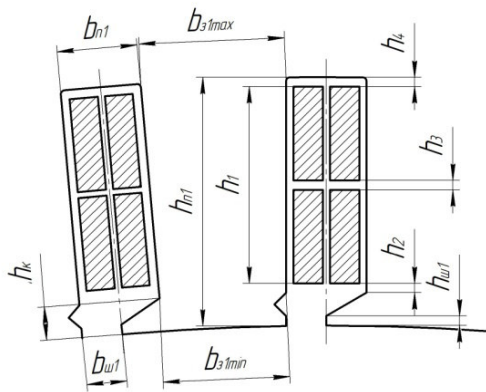
– при $h \geq 160$ мм

$$l_{B1} = (0,12 + 0,15 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 10. \quad (2.39)$$

2.2 Розрахунок обмотки статора із прямокутними відкритими та напіввідкритими пазами



а



б

а – відкритий паз; б – напіввідкритий паз

Рисунок 2.3 – Розміри
прямокутного паза статора

Для обмоток статора із прямокутною формою паза використовують проводи прямокутного поперечного перетину марок ПЕТВ і ПЕТВСД (клас нагрівостійкості В), ПЕТ– 155 (клас нагрівостійкості F) та ПЕТ– 200 (клас нагрівостійкості Н) [13 – 15]. Розшифрування маркування проводу:

- П – провід;
- Е – з емалевою ізоляцією;
- Т – термостійкий;
- В – високоміцний, стійкий до механічних впливів, може використовуватись для автоматизованого намотування;
- СД – має два шари обмотки скляними нитками (скловолокон), просочена лаком;
- 155 або 200 – максимальна робоча температура у градусах Цельсія.

Для визначення ширини зубця b_{3lmin} необхідно прийняти значення магнітної індукції B_{3lmax} у вузькому місці за таблицею 2.6. Висота шліца $h_{ш1} = 1,0$ мм, висота клина $h_k = 3,0– 3,5$ мм. За таблицею 2.7 визначають товщину ізоляції по висоті h_{u1} і ширині b_{u1} паза, припуски на збирання осердя по висоті h_c та ширині b_c .

Таблиця 2.6 – Значення магнітної індукції по ширині зубця

Форма паза	2р	IP44	IP23
		B_{3lmax} , Тл	
Напіввідкриті	2	1,75– 1,95	1,9– 2,1
	4; 6; 8; 10; 12	1,6– 1,8	1,7– 1,9
Відкриті	2	1,7– 1,9	1,8– 2,0
	4; 6; 8; 10; 12	1,6– 1,8	1,7– 1,9

Таблиця 2.7 – Товщина пазової ізоляції, припуски на збирання осердя

h, мм	Форма паза	h_{u1} , мм	b_{u1} , мм	h_c , мм	b_c , мм
280– 355	Напіввідкриті	4,5	1,1	0,3	0,3
280– 355	Відкриті	4,5	0,9	0,3	0,3

Зубцева поділка статора у вузькому місці, мм

$$t_{1min} = (D_1 + 2 \cdot h_{ш1} + 2 \cdot h_k) \cdot \frac{\pi}{z_1}. \quad (2.40)$$

Ширина зубця у найтоншому місці попередньо, мм

$$b_{з1min} = \frac{t_{1min} \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{з1max}}. \quad (2.41)$$

Ширина напіввідкритого і відкритого паза в штампі, мм

$$b_{n1} = t_{1min} - b_{з1min}. \quad (2.42)$$

Ширина шліца, мм

$$b_{ш1} = 0,6 \cdot b_{n1}. \quad (2.43)$$

Кількість ефективних провідників по ширині паза N_u визначається із урахуванням визначеного за (2.8) кількості ефективних провідників N'_{n1} . При напіввідкритих пазах і парному значенні N'_{n1} необхідно обрати $N_u=2$. При напіввідкритих пазах і непарному значенні N'_{n1} необхідно обрати $N_u=1$, при цьому кількість елементарних провідників має бути $c \geq 2$ і парним. При відкритих пазах приймається $N_u=1$; 2.

Припустима ширина ефективного провідника із витковою ізоляцією, мм

$$b_{еф} = (b_{n1} - 2 \cdot b_{u1} - b_c) / N_{ш}. \quad (2.44)$$

Кількість ефективних провідників по висоті паза

$$N_b = \frac{N'_{n1}}{N_{ш}}. \quad (2.45)$$

Висота спинки статора, мм

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{c1}}. \quad (2.46)$$

При розрахунку висоти спинки статора слід прийняти, що значення магнітної індукції у спинці статора B_{c1} не повинно перевищувати 1.6 Тл.

Висота паза, мм

$$h_{п1} = \frac{D_{H1} - D_1}{2} - h_{c1}. \quad (2.47)$$

Припустима висота ефективного провідника із витковою ізоляцією, мм

$$h_{\text{еф}} = (h_{\text{п1}} - h_{\text{и1}} - h_{\text{к}} - h_{\text{ш1}} - h_{\text{с}}) / N_{\text{в}}. \quad (2.48)$$

Площа ефективного провідника, мм²

$$S_{\text{еф}} = h_{\text{еф}} \cdot b_{\text{еф}}. \quad (2.49)$$

Один ефективний провідник може бути поділений на певну кількість елементарних провідників. Кількість елементарних провідників визначається із максимально припустимої площі перетину $S_{\text{макс}}$, ширини $b_{\text{макс}}$ та висоти $a_{\text{макс}}$ елементарного провідника. Для напіввідкритих пазів: $S_{\text{макс}}=10 \text{ мм}^2$, $b_{\text{макс}}=4,7 \text{ мм}$; для відкритих пазів: $S_{\text{макс}}=18 \text{ мм}^2$, $b_{\text{макс}}=7,4 \text{ мм}$. Висота елементарного провідника $a_{\text{макс}}$ у залежності від напруги: для низьковольтних електричних машин $a_{\text{макс}}=2,12 \text{ мм}$, для високовольтних електричних машин $a_{\text{макс}}=2,5 \text{ мм}$. Прямокутні провідники розташовуються у пазу більшою стороною по ширині пазу.

Попередньо кількість елементарних провідників можна визначити за (2.49). Отримане значення округлюють до цілого у більшу сторону, після чого необхідно уточнити кількість елементарних провідників по висоті паза c_a і по ширині паза c_b таким чином, щоб виконувалась рівність (2.50).

Кількість елементарних провідників

$$c = \frac{S_{\text{еф}}}{S_{\text{макс}}}, \quad (2.50)$$

$$c = c_a \cdot c_b. \quad (2.51)$$

Попередньо можна визначити кількість ефективних провідників за наступними виразами

$$c_b = \frac{b_{\text{еф}}}{b_{\text{макс}}}, \quad (2.52)$$

$$c_a = \frac{c}{c_b}. \quad (2.53)$$

Двостороння товщина ізоляції для обмотувальних проводів марок ПЕТВ, ПЕТ– 155, ПЕТ– 200 складає $\Delta_{\text{із}}=0,15 \text{ мм}$.

Менший розмір неізолюваного елементарного проводу

$$a' = \frac{h_{\text{еф}}}{c_a} - \Delta_{\text{із}}. \quad (2.54)$$

Якщо визначений менший розмір провідника $a' > a_{\text{макс}}$, то необхідно обрати більшу кількість паралельних провідників c_a .

Більший розмір неізолюваного елементарного проводу

$$b' = \frac{b_{\text{еф}}}{c_b} - \Delta_{\text{із}}. \quad (2.55)$$

Якщо визначений менший розмір провідника $b' > b_{\text{макс}}$, то необхідно обрати більшу кількість паралельних провідників c_b .

За визначеними значеннями a' і b' із сортаменту проводупрямокутного перетину (Додаток А) обирають розміри провідника a , b і площу перетину провідника S .

Розмір паза в штампі по висоті, мм

$$h_{\text{п1}} = N_{\text{р}} \cdot c_a \cdot (a + \Delta_{\text{із}}) + h_{\text{и1}} + h_{\text{с}}. \quad (2.56)$$

Розмір паза в штампі по ширині, мм

$$b_{\text{п1}} = N_{\text{п}} \cdot c_b \cdot (b + \Delta_{\text{із}}) + 2 \cdot b_{\text{и1}} + b_{\text{с}}. \quad (2.57)$$

Після розрахунку розмірів паза в штампі необхідно уточнити ширину зубця $b_{\text{з1min}}$ та значення магнітної індукції у вузькій частині зубця $B_{\text{з1max}}$, висоту спинки статора $h_{\text{с1}}$, магнітну індукцію у спинці статора $B_{\text{с1}}$ за формулами (2.42), (2.41), (2.47), (2.46) відповідно. Далі за (2.32) знаходять густину струму J_1 та питоме теплове навантаження $J_1 \cdot A_1$, яке порівнюють із значенням, знайденим за рис. 2.2 так само як і для трапецеїдальних пазів статора.

Середній зубцевий поділ статора, мм

$$t_{\text{ср1}} = \pi \cdot (D_1 + h_{\text{п1}}) / z_1. \quad (2.58)$$

Середня ширина котушки обмотки статора, мм

$$b_{\text{ср1}} = t_{\text{ср1}} \cdot y_{\text{п1}}. \quad (2.59)$$

Середня довжина однієї лобової частини обмотки, мм

$$l_{\text{л1}} = 1,3 \cdot b_{\text{ср1}} + h_{\text{н1}} + 50. \quad (2.60)$$

Середня довжина витка обмотки

$$l_{\text{ср1}} = 2 \cdot (l_{\text{л1}} + l_1). \quad (2.61)$$

Довжина вильота лобової частини обмотки, мм

$$l_{\text{в1}} = 0,4 \cdot b_{\text{ср1}} + 0,5 \cdot h_{\text{н1}} + 25. \quad (2.62)$$

3 РОЗРАХУНОК ЗУБЦЕВОЇ ЗОНИ І ОБМОТКИ РОТОРА

Обмотка короткозамкненого ротора представляє собою литі у пази алюмінієві або мідні стрижні. На обох кінцях стрижні закорочені торцевими кільцями, литі одночасно зі стрижнями для алюмінію або паяні для міді. Конструкція ротора є шихтованою і складається з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. З листів виштамповують пластини необхідної конфігурації і збирають на валу або на оправку у осердя ротора. Для мінімізації втрат на вихрові струми пластини ізолюють лаковим або оксидним покриттям.

Форму пазів короткозамкненого ротора обирають у залежності від габариту, числа пар полюсів і необхідних пускових характеристик. Пази мають напівзакрите або закрите виконання, така конструкція зменшує магнітне зубчасте зачеплення, що робить плавним пуск, знижує шум, вібрацію і втрати. У поточному розділі буде наведено розрахунки пазів овальної і лопаткової форми. Форма паза оптимізована для певних характеристик продуктивності, таких як пусковий момент і ККД. Рекомендації щодо вибору форми пазів короткозамкненого ротора у залежності від висоти осі обертання наведено у таблиці 3.1.

Розрахунок короткозамкненого ротора виконують наступним чином. Індукція в зубці ротора визначається за табл. 3.1, висота пазу $h_{п2}$ короткозамкненого ротора за рис.3.1.

Таблиця 3.1 – Форма паза і гранично припустиме значення магнітної індукції у зубцевій зоні ротора

h, мм	2p	Форма паза	$B_{з2}$, Тл	
			IP44	IP23
≤132	2; 4; 6; 8	Рис. 3.2, а	1,60– 1,80	1,85– 2,05
160...250	2	Рис. 3.2, а	1,75– 1,95	1,85– 2,05
	4; 6; 8	Рис. 3.2, б	1,70– 1,90	1,75– 1,95
280...355	2	Рис. 3.3	1,60– 1,80	1,80– 2,00
	4	Рис. 3.3	1,80– 2,00	2,00– 2,20
	6; 8; 10; 12	Рис. 3.3	1,70– 1,90	1,80– 2,00

Кількість пазів ротора z_2 для асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором обирають у залежності від z_1 та наявності скосу пазів у роторі (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Рекомендовані значення кількості пазів ротора

2р	z_1	z_2 (пази без скосу)	z_2 (пази з скосом)
1	2	3	4
2	18	15, 21, 22	19, 22, 26, 28, 31, 33, 34, 35
	24	15, 17, 19, 32	19, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	20, 21, 23, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 28, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	24	16, 17	16, 18, 28, 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 38, 44, 46	27, 28, 30, 34, 38, 45, 48
	48	34, 38, 56, 62, 64	38, 40, 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 46	28, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	36	—	28
	48	36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, 70, 98, 100, 102, 104	—
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104	99, 101, 103, 117, 123, 137
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	86, 87, 93, 94
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112

Співвідношення між z_1 і z_2 обирають виходячи з наступних міркувань: зменшення впливу поля гармонік вищих порядків на криву моменту, зменшення шумів та вібрацій двигуна, мінімальні додаткові втрати в сталі зубців. У таблиці 3.3 наведені співвідношення кількості пазів для двигунів серії 4А.

Таблиця 3.3 – Рекомендована кількість пазів статора і ротора

h , мм	z_1/z_2			
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
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

Для зниження рівня шуму і вібрації, покращення пускових характеристик для асинхронних двигунів із висотою вісі обертання до 160 мм включно виконують скос пазів. Скос пазів короткозамкнутого ротора зазвичай виконують на одну зубцеву поділку.

Розрахункова висота спинки ротора при $2 \cdot p = 2; 4$, мм

$$h_{c2} = \frac{2 + p}{3.2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_{H2}}{2} - h_{H2} \right) - \frac{2}{3} \cdot d_k, \quad (3.1)$$

де h_{H2} – обирають за рис.3.1.

Розрахункова висота спинки ротора при $2 \cdot p \geq 6$, мм

$$h_{c2} = \frac{D_{H2} - D_2}{2} - h_{H2} - \frac{2}{3} \cdot d_k. \quad (3.2)$$

Магнітна індукція в спинці ротора, Тл

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot h_{c2}}. \quad (3.3)$$

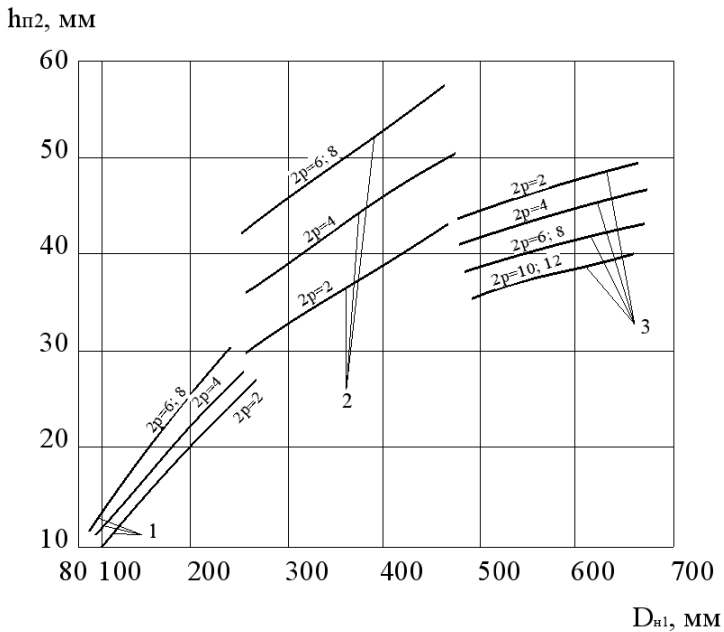
Значення магнітної індукції, отримані за (3.3) необхідно порівняти із максимально припустимим значення магнітної індукції за табл. 3.4.

Зубцевий поділ по зовнішньому діаметру ротора, мм

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{z_2}. \quad (3.4)$$

Таблиця 3.4 – Максимально припустиме значення магнітної індукції у спинці ротора

Ступінь захисту	B_{c2}			
	$2 \cdot p = 2$	$2 \cdot p = 4$	$2 \cdot p = 6, 8$	$2 \cdot p = 10, 12$
IP44	1.45	1.25	1.15	0.85
IP23	1.55	1.35	1.25	0.95



1 – ротор з овальними напівзакритими пазами; 2 – ротор з овальними закритими пазами; 3 – ротор з лопатковими пазами.

Рисунок 3.1 – Середні значення висоти пазу ротора

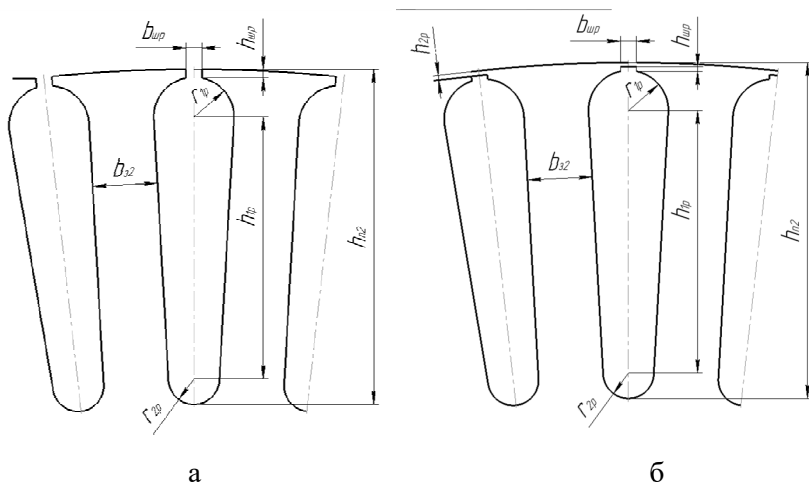
3.1 Розрахунок ротора із овальними напівзакритими та закритими пазами

Для типорозміру двигуна до 250 мм пази ротора виконують овальними (рис. 3.2), при чому радіуси пазу r_{1p} та r_{2p} обирають такими, щоб стінки зубців були паралельними ($b_{z2} = \text{const}$).

Для напівзакритого пазу відповідно до рис. 3.2, а: $h_{шp} = 0,5 \dots 0,75 \text{ мм}$, $b_{шp} = 1,0 \dots 1,5 \text{ мм}$. Для закритого пазу відповідно до рис.3.2, б: $h_{шp} = 0,7 \text{ мм}$, $h_{2p} = 0,3 \text{ мм}$, $b_{шp} = 1,5 \text{ мм}$.

Ширина зубця, мм

$$b_{32} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{B_{32} \cdot k_c}. \quad (3.5)$$



а – овальний напівзакритий, б – овальний закритий
Рисунок 3.2 – Паз ротора

Менший радіус пазу, мм

$$r_{2p} = \frac{\pi \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_{п2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 - \pi)}. \quad (3.6)$$

Якщо менший радіус пазу r_{2p} після розрахунків виявиться менше ніж 1 мм, тоді необхідно взяти більше значення індукції у зубці ротора.

Більший радіус пазу, мм

$$r_{1p} = \frac{\pi \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_{2p} - h_{шp}) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 + \pi)}. \quad (3.7)$$

Відстань між центрами радіусів, мм

$$h_{1p} = h_{п2} - h_{шp} - h_{2p} - r_{1p} - r_{2p}. \quad (3.8)$$

Перевірка правильності визначення більшого та меншого радіусу пазів ротора виконується за співвідношенням

$$\pi \cdot h_{1p} - z_2 \cdot (r_{1p} - r_{2p}) \approx 0. \quad (3.9)$$

Площа поперечного перетину паза в штампі, мм²

$$S_{ст} = 0,5 \cdot (r_{1p}^2 + r_{2p}^2) \cdot \pi + (r_{1p} + r_{2p}) \cdot h_{1p}. \quad (3.10)$$

3.2 Розрахунок ротора із лопатковими пазами

Для типорозміру двигуна від 280 мм пази ротора виконують лопатковими закритими (рис. 3.3), при чому розміри нижньої частини обирають такими, щоб стінки зубців у цій частині були паралельними ($b_{зп2} = \text{const}$).

Ширина зубця у нижній частині, мм

$$b_{зп2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{B_{з2} \cdot k_c}. \quad (3.11)$$

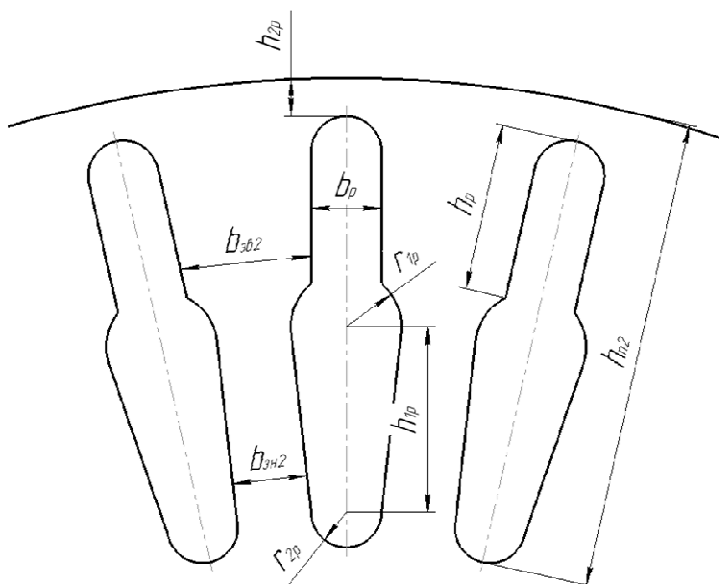


Рисунок 3.3 – Лопатковий паз ротора

Менший радіус пазу, мм

$$r_{2p} = \frac{\pi \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_{п2}) - z_2 \cdot b_{зн2}}{2 \cdot (z_2 - \pi)}. \quad (3.12)$$

Більший радіус пазу, мм

$$r_{1p} = \frac{\pi \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_{2p} - 2 \cdot h_p) - z_2 \cdot b_{зн2}}{2 \cdot (z_2 + \pi)}, \quad (3.13)$$

де $h_{2p} = 0,2 \dots 0,5$ мм,

$h_p = 15$ мм.

Відстань між центрами радіусів, мм

$$h_{1p} = h_{п2} - h_p - h_{2p} - r_{1p} - r_{2p}. \quad (3.14)$$

Перевірка правильності визначення більшого та меншого радіусу пазів ротора виконується за співвідношенням

$$\pi \cdot h_{1p} - z_2 \cdot (r_{1p} - r_{2p}) \approx 0. \quad (3.15)$$

Ширина верхньої частини стрижня, мм

$$b_p = k_p \cdot r_{2p}, \quad (3.16)$$

де $k_p = 1 \dots 1,25$.

Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня, мм²

$$S_{стн} = 0,5 \cdot (r_{1p}^2 + r_{2p}^2) \cdot \pi + (r_{1p} + r_{2p}) \cdot h_{1p}. \quad (3.17)$$

Площа поперечного перетину верхньої частини стрижня, мм²

$$S_{ств} = b_p \cdot (h_p - 0,11 \cdot b_p). \quad (3.18)$$

Загальна площа поперечного перетину стрижня, яка дорівнює площі поперечного перетину паза у штампі, мм²

$$S_{ст} = S_{п2} = S_{стн} + S_{ств}. \quad (3.19)$$

3.3 Розрахунок короткозамкненого кільця

Далі проводимо розрахунок короткозамкненого кільця обмотки ротора. За технологією виготовлення розрізняють литі та зварні клітки короткозамкнених роторів. Короткозамкнену обмотку ротора із пазами трапецеїдальної форми виконують або литою з алюмінію, або зварною мідною. Обмотку ротора із

лопатковими пазами виконують литою з алюмінію або його сплавів.

Поперечний перетин короткозамкненого кільця, мм²:

– литої клітки

$$S_{\text{кл}} = \frac{(0,35 \dots 0,45) \cdot z_2 \cdot S_{\text{ст}}}{2 \cdot p}, \quad (3.20)$$

– зварної клітки

$$S_{\text{кл}} = \frac{0,4 \cdot z_2 \cdot S_{\text{ст}}}{2 \cdot p}. \quad (3.21)$$

Висота кільця, мм

– литої клітки

$$h_{\text{кл}} = (1,1 \dots 1,2) \cdot h_{\text{п2}}, \quad (3.22)$$

– зварної клітки

$$h_{\text{кл}} = 1,2 \cdot h_{\text{п2}}. \quad (3.23)$$

Довжина кільця, мм

$$l_{\text{кл}} = \frac{S_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}}. \quad (3.24)$$

Середній діаметр кільця, мм

– литої клітки

$$D_{\text{клср}} = D_{\text{н2}} - h_{\text{кл}}, \quad (3.25)$$

– зварної клітки

$$D_{\text{клср}} = D_{\text{н2}} - 2 \cdot h_{\text{кл}} - 2 \cdot h_{\text{шр}} - 0,5 \cdot h_{\text{ст}}. \quad (3.26)$$

Вильот лобової частини обмотки, мм

$$l_{\text{в2}} = k_{\text{л}} \cdot l_{\text{л2}} + l_{\text{кл}}, \quad (3.27)$$

де $l_{\text{л2}} = 50$ мм – довжина лобової частини стрижня,

$k_{\text{л}} = 0,9$ – коефіцієнт, який враховує вигин стрижня.

4 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА

Асинхронні двигуни відносяться до електричних машин із симетричним магнітним ланцюгом. В таких машинах розрахунок магнітного ланцюга можна обмежити до розрахунку МРС на полюс.

Магнітний ланцюг асинхронного двигуна складається з наступних п'яти однорідних ділянок, які послідовно з'єднані: спинка статора, зубці статора, повітряний зазор, зубці ротора, спинка ротора. При розрахунку магнітної напруги кожної ділянки приймається рівномірний розподіл магнітної індукції по заданій ділянці.

Порядок розрахунку магнітного ланцюга наведений нижче і для кожної ділянки включає такі етапи: визначення площі поперечного перетину ділянки, магнітної індукції, напруженість поля, середню довжину шляху магнітного потоку, магніторушійну силу ділянки. Після визначення МРС усіх ділянок визначають сумарну електрорушійну силу на один полюс. Розрахунок проводиться для номінального режиму роботи.

4.1 МРС повітряного зазору

У цьому розділі наведено порядок розрахунку магніторушійної сили повітряного зазору. Розсіювання магнітного потоку та відповідне підвищення магнітного опору в зазорі через вплив конструкції статора враховується наступним коефіцієнтом

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\text{ш}1}}{t_1 - b_{\text{ш}1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{\text{ш}1}}}. \quad (4.1)$$

Розсіювання магнітного потоку та відповідне підвищення магнітного опору в зазорі через вплив конструкції ротора враховується наступним коефіцієнтом

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш}p}}{t_2 - b_{\text{ш}p} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш}p}}}. \quad (4.2)$$

Коефіцієнт, що коригує розрахункову провідність повітряного зазору з урахуванням його викривлення у зонах розташування радіальних вентиляційних каналів (l_n – довжина пакету)

$$k_k = 1 - \frac{3 \cdot \delta}{l_n + 3 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{l_n}{l_k}\right)}. \quad (4.3)$$

Якщо канали на статорі та роторі співпадають

$$k_k = 1 - \frac{1,5 \cdot \delta}{l_n + 1,5 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{l_n}{l_k}\right)}. \quad (4.4)$$

Якщо радіальні канали відсутні приймаємо $k_k = 1$.

Сумарний коефіцієнт повітряного зазору

$$k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_k. \quad (4.5)$$

МРС повітряного зазору, А

$$F_\delta = 0,8 \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot B_\delta \cdot 10^3. \quad (4.6)$$

4.2 МРС зубцевої зони статора для трапецеїдального пазу

При значення індукції $B_{31} \leq 1,8$ Тл напруженість магнітного поля визначаємо із таблиці 4.1 або 4.2.

При значення індукції $B_{31} > 1,8$ Тл напруженість магнітного поля визначаємо за 1/3 висоти зубця.

Зубцевий поділ на 1/3 висоти зубця, мм

$$t_{113} = \frac{\pi}{z_1} \cdot \left(D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{п1}\right). \quad (4.7)$$

Коефіцієнт зубців

$$k_{113} = \frac{t_{113}}{b_{31} \cdot k_c}. \quad (4.8)$$

За розрахованими значеннями t_{113} та k_{113} за графіком рис. 4.1 або 4.2 визначаємо напруженість магнітного поля для зубцевої зони статора H_{31} . Середня довжина шляху магнітного потоку, мм

$$L_{31} = h_{п1}. \quad (4.9)$$

МРС зубців статора, А

$$F_{31} = 0,1 \cdot L_{31} \cdot H_{31}. \quad (4.10)$$

Таблиця 4.1 – Таблиця намагнічування для зубців машин змінного струму. Сталь 2013.

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/см									
0,4	1,24	1,27	1,3	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50
0,5	1,54	1,57	1,6	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,8	1,84
0,6	1,88	1,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,24
0,7	2,23	2,26	2,29	2,33	2,36	2,40	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	2,56	2,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,7	3,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,3	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	4,95	5,04	5,14	5,24	5,33	5,63	5,74	5,84	5,95
1,4	5,86	5,98	6,10	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	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	8,5	8,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,2	10,5	10,8	11,1
1,7	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0	14,4	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	89,2	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

Таблиця 4.2 – Таблиця намагнічування для зубців машин змінного струму. Сталь 2312.

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/см									
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,71
0,5	1,74	1,77	1,80	1,84	1,86	1,90	1,92	1,96	1,98	2,02
0,6	2,04	2,09	2,13	2,16	2,21	2,24	2,29	2,33	2,37	2,41
0,7	2,45	2,49	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87
0,8	2,92	2,97	3,02	3,06	3,11	3,16	3,22	3,26	3,31	3,37
0,9	3,42	3,47	3,53	3,60	3,66	3,72	3,79	3,84	3,90	3,96
1,0	4,03	4,09	4,17	4,25	4,33	4,40	4,50	4,60	4,70	4,77
1,1	4,88	4,97	5,09	5,17	5,27	5,37	5,47	5,59	5,70	5,82
1,2	5,93	6,02	6,13	6,26	6,38	6,51	6,63	6,77	6,95	7,10
1,3	7,24	7,38	7,55	7,70	7,90	8,04	8,20	8,40	8,57	8,79

Продовження таблиці 4.2

1,4	8,97	9,17	9,36	9,55	9,77	10	10,2	10,4	10,6	10,9
1,5	11,2	11,5	11,7	12,1	12,4	12,7	13,1	13,3	13,7	14,1
1,6	14,5	14,9	15,3	15,6	16,1	16,5	16,9	17,5	17,9	18,4
1,7	19	19,4	20	20,7	21,4	22,2	23	23,8	25	26
1,8	27	28	29,2	30,5	32,2	33,3	34,9	36,1	37,1	40
1,9	41,6	43,5	46	48	50,3	53,3	54,3	57,9	61,3	64,2
2,0	67,5	71,7	74	77,9	81,5	85,2	90	94	97,5	102
2,1	106	110	115	121	126	130	135	141	147	154
2,2	159	165	173	178	185	191	196	203	211	220
2,3	231	243	255	268	281	295	309	324	339	364

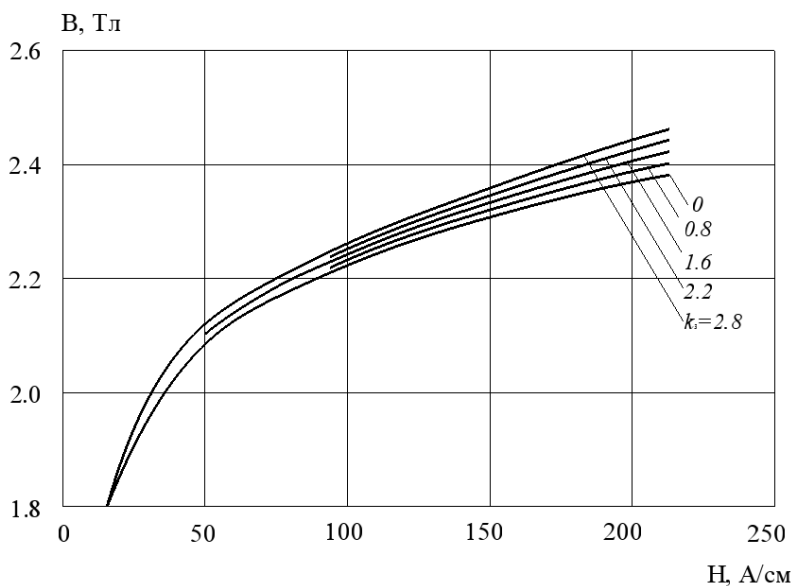


Рисунок 4.1 – Крива намагнічування для зубців машин змінного струму при $B_{з1} > 1.8$ Тл для сталі 2013 для коефіцієнту k_{313} від 0 до 2.8

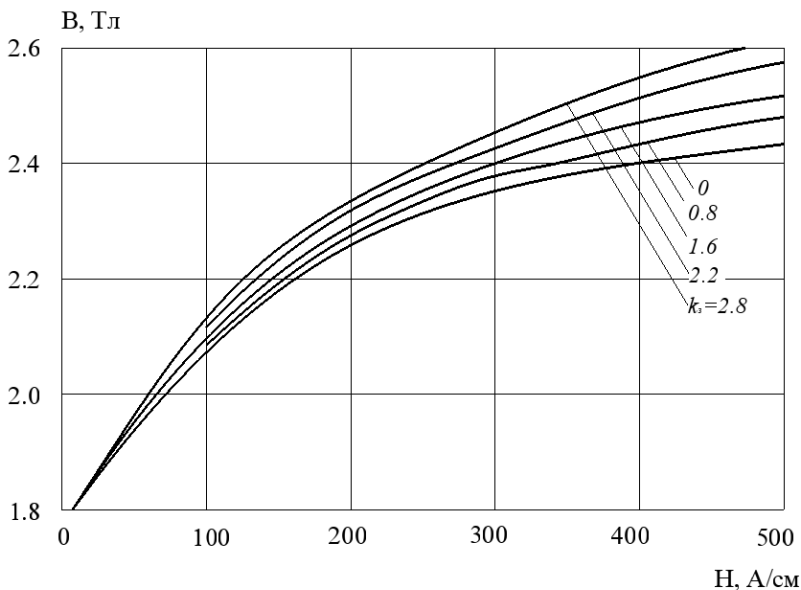


Рисунок 4.2– Крива намагнічування для зубців машин змінного струму при $B_{з1} > 1.8$ Тл для сталі 2312 для коефіцієнту k_3 від 0 до 2.8

4.3 МРС зубцевої зони статора для прямокутного пазу

При значення індукції $B_{з1\max} \leq 1.8$ Тл розрахунок проводиться для $1/3$ висоти зубця.

Зубцевий поділ на $1/3$ висоти зубця, мм

$$t_{113} = \frac{\pi}{z_1} \cdot \left(D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{п1} \right). \quad (4.11)$$

Ширина зубця, мм

$$b_{з113} = t_{113} - b_{п1}. \quad (4.12)$$

Магнітна індукція на $1/3$ висоти зубця, Тл

$$B_{з113} = \frac{t_{113} \cdot B_\delta}{b_{з113} \cdot k_c}. \quad (4.13)$$

Напруженість магнітного поля $H_{з1}$ визначається за таблицями 4.1 або 4.2 в залежності від марки сталі.

При значення індукції $B_{31max} > 1,8$ Тл розрахунок проводиться для мінімального, максимального та середнього значення напруженості магнітного поля.

Зубцева поділка статора за мінімальним перетином зубця, мм

$$t_{1min} = (D_1 + 2 \cdot h_{ш1} + 2 \cdot h_k) \cdot \frac{\pi}{z_1}. \quad (4.14)$$

Зубцева поділка за максимальним перетином зубця, мм

$$t_{1max} = (D_1 + 2 \cdot h_{п}) \cdot \frac{\pi}{z_1}. \quad (4.15)$$

Ширина зубця у вузькій частині, мм

$$b_{31min} = t_{1min} - b_{n1}. \quad (4.16)$$

Ширина зубця у широкій частині, мм

$$b_{31max} = t_{1max} - b_{n1}. \quad (4.17)$$

Ширина зубця у середній частині, мм

$$b_{31cp} = \frac{b_{31min} + b_{31max}}{2}. \quad (4.18)$$

Магнітна індукція зубця статора у вузькій частині, Тл

$$B_{31max} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_c \cdot b_{31min}}. \quad (4.19)$$

Магнітна індукція зубця статора у широкій частині, Тл

$$B_{31min} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_c \cdot b_{31max}}. \quad (4.20)$$

Магнітна індукція зубця статора у середній частині, Тл

$$B_{31cp} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_c \cdot b_{31cp}}. \quad (4.21)$$

Коефіцієнт зубців у вузькій частині

$$k_{31max} = \frac{t_{1min}}{b_{31min} \cdot k_c} - 1. \quad (4.22)$$

Коефіцієнт зубців у широкій частині

$$k_{31min} = \frac{t_{1max}}{b_{31max} \cdot k_c} - 1. \quad (4.23)$$

Коефіцієнт зубців у середній частині

$$k_{31cp} = \frac{k_{31max} + k_{31min}}{2}. \quad (4.24)$$

Напруженість магнітного поля визначається для кожного перетину окремо: у вузькій частині H_{31max} – за рис. 4.1 або 4.2, у широкій частині H_{31min} – за рис.4.1, 4.2 або за табл. 4.1, 4.2, у середній частині H_{31cp} – за рис.4.1, 4.2 або за табл. 4.1, 4.2.

Середнє значення напруженості магнітного поля, А/см

$$H_{31} = \frac{H_{31max} + 4 \cdot H_{31cp} + H_{31min}}{6}. \quad (4.25)$$

Середня довжина магнітного шляху і МРС для зубців статора визначається за (4.9) і (4.10) відповідно.

4.4 МРС зубцевої зони ротора при овальних напівзакритих і закритих пазах

При значення індукції $B_{32} \leq 1,8$ Тл напруженість магнітного поля визначаємо із таблиці 4.1 або 4.2 у залежності від марки сталі, з якої виготовлено осердя ротора. При значенні індукції $B_{32} > 1,8$ Тл напруженість магнітного поля визначаємо за 1/3 висоти зубця.

Зубцевий поділ на 1/3 висоти зубця

$$t_{213} = \frac{\pi}{z_2} \cdot \left(D_{н2} - \frac{4}{3} \cdot h_{п2} \right). \quad (4.26)$$

Коефіцієнт зубців

$$k_{213} = \frac{t_{213}}{b_{32} \cdot k_c} - 1. \quad (4.27)$$

За розрахованими значеннями t_{213} та k_{213} за графіком рис. 4.1 або 4.2 визначаємо напруженість магнітного поля H_{32} .

Середня довжина шляху магнітного потоку

$$L_{32} = h_{п2} - 0,2 \cdot r_{2p}. \quad (4.28)$$

МРС зубців ротора

$$F_{32} = 0,1 \cdot L_{32} \cdot H_{32}. \quad (4.29)$$

4.5 МРС зубцевої зони ротора при лопаткових пазах

Середня ширина верхньої частини зубця, мм

$$b_{зв2} = \frac{\pi}{z_2} \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_{2p} - h_p) - b_p. \quad (4.30)$$

Магнітна індукція у середньому перетині верхньої частини зубця, Тл

$$B_{зв2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{b_{зв2} \cdot k_c}. \quad (4.31)$$

Напруженість магнітного поля у верхній частині зубця $H_{зв2}$ визначають за табл. 4.1 або 4.2 у залежності від марки сталі, з якої виготовлено осердя ротора.

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм

$$L_{зв2} = h_{2p} + h_p. \quad (4.32)$$

МРС для верхньої частини зубця, А

$$F_{зв2} = 0,1 \cdot H_{зв2} \cdot L_{зв2}. \quad (4.33)$$

Магнітна індукція в нижній частині зубця, Тл

$$B_{зн2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{b_{зн2} \cdot k_c}. \quad (4.34)$$

Якщо $B_{зн2} \leq 1,8$ Тл напруженість поля в нижній частині зубця $H_{зн2}$ визначається за таблицею 4.1 або 4.2. Якщо $B_{зн2} > 1,8$ Тл напруженість магнітного поля $H_{зн2}$ визначають за 1/3 висоти зубця. Зубцева поділлка на 1/3 висоти зубця, мм

$$t_{н213} = \frac{\pi}{z_2} \cdot \left(D_{н2} - \frac{4}{3} \cdot \left(h_{п2} - \frac{2}{3} \cdot (h_{2p} + h_p) \right) \right). \quad (4.35)$$

Коефіцієнт зубців

$$k_{зн13} = \frac{t_{н213}}{b_{зн2} \cdot k_c} - 1. \quad (4.36)$$

Напруженість магнітного поля в нижній частині зубця визначають за рис. 4.1. або 4.2.

Середня довжина шляху магнітного потоку в нижній частині зубця, мм

$$L_{зн2} = r_{1p} + h_{1p} + 0,8 \cdot r_{2p}. \quad (4.37)$$

МРС для нижньої частини зубця, А

$$F_{зн2} = 0,1 \cdot H_{зн2} \cdot L_{зн2}. \quad (4.38)$$

МРС для зубців ротора, А

$$F_{з2} = F_{зв2} + F_{зн2}. \quad (4.39)$$

4.6 МРС спинки статора

МРС спинки статора визначають за табл. 4.3 у залежності від значення магнітної індукції у спинці статора, кількості полюсів і марки сталі, з якої виготовлено осердя статора.

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм

$$L_{c1} = \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot (D_{н1} - h_{c1}). \quad (4.40)$$

МРС спинки статора, А

$$F_{c1} = 0,1 \cdot L_{c1} \cdot H_{c1}. \quad (4.41)$$

Таблиця 4.3 – Визначення МРС спинки статора

Умова	Порядок розрахунку
$2p=2$ та $B_{c1} \leq 1,4$ Тл	Напруженість магнітного поля H_{c1} визначається за табл. 4.4 або 4.5
$2p \geq 4$	Напруженість магнітного поля H_{c1} визначається за табл. 4.4 або 4.5
$2p=2$ та $B_{c1} > 1,4$ Тл	Напруженість магнітного поля H_{c1} визначається за табл. 4.6 або 4.7, при цьому значення B_{c1} зменшують на 0.4 Тл.

4.7 МРС спинки ротора

МРС спинки ротора визначають у залежності від значення магнітної індукції у спинці ротора, кількості полюсів і марки сталі, з якої виготовлено осердя ротора.

При $2 \cdot p = 2$ напруженість магнітного поля H_{c2} визначаємо за таблицею 4.4 або 4.5.

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм

$$L_{c2} = h_{c2} + \frac{2 \cdot d_k}{3}. \quad (4.42)$$

При $2 \cdot p \geq 4$ напруженість магнітного поля H_{c2} визначаємо за таблицею 4.6 або 4.7.

Середня довжина шляху магнітного потоку, мм

$$L_{c2} = \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot \left(D_2 + h_{c2} + \frac{4 \cdot d_k}{3} \right). \quad (4.43)$$

МРС спинки ротора, А

$$F_{c2} = 0,1 \cdot L_{c2} \cdot H_{c2}. \quad (4.44)$$

4.8 Параметри магнітного ланцюга

Сумарна МРС магнітного ланцюга на один полюс, А

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2}. \quad (4.45)$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга

$$k_{\text{нас}} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}}. \quad (4.46)$$

Розрахункове значення коефіцієнта насичення магнітного ланцюга $k_{\text{нас}}$ за (4.46) має бути меншим за 1.7.

Намагнічуючий струм, А

$$I_{\text{м}} = \frac{2.22 \cdot F_{\Sigma} \cdot p}{m \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}}}. \quad (4.47)$$

Намагнічуючий струм у в. о.

$$I'_{\text{м}} = \frac{I_{\text{м}}}{I_1}. \quad (4.48)$$

ЕРС неробочого ходу, В

$$E = k_{\text{н}} \cdot U_1. \quad (4.49)$$

Головний індуктивний опір, Ом

$$x_{\text{м}} = \frac{E}{I_{\text{м}}}. \quad (4.50)$$

Головний індуктивний опір у в. о.

$$x'_{\text{м}} = \frac{x_{\text{м}} \cdot I_1}{U_1}. \quad (4.51)$$

Таблиця 4.4 – Значення намагнічення для спинки машин змінного струму для сталі 2013

В, Тл	H, А/см									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
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
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	2,17	2,29	2,33	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57
1,2	2,62	2,67	2,72	2,77	2,83	2,89	2,95	3,01	3,07	3,13
1,3	3,20	3,27	3,34	3,41	3,49	3,57	3,65	3,73	3,82	3,91
1,4	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,5	5,20	5,42	5,64	5,86	6,08	6,30	6,54	6,78	7,02	7,26
1,6	7,50	7,88	8,26	8,64	9,02	9,40	9,82	10,2	10,7	11,1
1,7	11,5	12,2	12,9	13,6	14,3	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,8	20,0	21,6	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2
1,9	35,7	38,0	40,3	42,6	44,9	47,2	49,3	51,4	53,5	55,6
2,0	57,7	60,0	63,0	66,0	70,0	74,0	79,0	84,09	90,0	97,0

Таблиця 4.5 – Значення намагнічення для спинки машин змінного струму для сталі 2312

В, Тл	H, А/см									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
0,5	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,6	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
0,7	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,80	1,83	1,86	1,90
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	2,52	2,55	2,60	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,00	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,67	3,74	3,82	3,90	3,98
1,2	4,10	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,85	6,00	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,17	7,40	7,63	7,89	8,15	8,43	8,70
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	28,4	29,8	31,3	32,9
1,8	34,6	36,3	38,0	39,7	41,4	43,1	44,9	46,7	48,5	50,4
1,9	52,2	56,0	60,0	64,0	69,0	74,0	79,0	85,0	91,0	97,0
2,0	104	111	118	125	133	141	149	158	167	176

Таблиця 4.6 – Основна таблиця намагнічення для сталі 2013

В, Тл	H, А/см									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
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	1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,0	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,0	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90
1,4	3,0	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,0	5,40	5,80

Продовження таблиці 4.6

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, 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	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66,0
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
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

Таблиця 4.7 –Основна таблиця намагнічення для сталі 2312

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,75
0,5	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
0,9	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,60	4,70	4,80	5,00	5,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4

Продовження таблиці 4.7

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/cm									
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	38,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	82,0	89,0	94,0	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188
1,9	194	200	218	237	257	278	300	322	344	366
2,0	388	410	434	460	480	521	557	597	641	689
2,1	740	800	860	920	980	1050	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

5 АКТИВНІ ТА ІНДУКТИВНІ ОПОРИ ОБМОТОК

Визначення активних та індуктивних опорів статора та ротора необхідне для розрахунку режиму неробочого ходу, номінальних параметрів, робочих та пускових характеристик, а також побудови кругових діаграм.

При розрахунку індуктивних опорів поле розсіяння умовно розбивають на три складові: пазову, диференціальну та лобову частини обмоток.

Провідність пазового розсіяння залежить від форми та розмірів пазу. Провідність диференційного розсіяння обумовлена вищими гармоніками. Скос пазів зменшує демпфуючу реакцію струмів. Провідність розсіяння лобових частин обмотки залежить від кількості пазів на полюс та фазу, довжини лобової частини котушки та від скорочення кроку обмотки.

Активні та індуктивні опори обмотки статора у відносних одиницях можна визначити за різними формулами, але результат має збігатись.

5.1 Опір обмотки статора

Активний опір обмотки фази при 20 °С, Ом

$$r_1 = \frac{w_1 \cdot l_{cp1}}{\rho_{m20} \cdot a_1 \cdot c \cdot S \cdot 10^3}. \quad (5.1)$$

де ρ_{m20} – питома електрична провідність, для міді при 20°С $\rho_{m20}=57$ См/мкм.

Активний опір обмотки фази при 20 °С у в. о.

$$r'_1 = \frac{r_1 \cdot I_1}{U_1}. \quad (5.2)$$

Перевірку правильності визначення активного опору фази у в. о. здійснюється за формулою

$$r'_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot J_1 \cdot l_{cp1}}{114 \cdot 10^4 \cdot m \cdot U_1 \cdot I_1}. \quad (5.3)$$

Коефіцієнти, які враховують скорочення кроку

- при $\beta = 0,65 \dots 1,0$

$$k_{\beta 1} = 0,4 + 0,6 \cdot \beta_1.$$

$$k'_{\beta 1} = 0,2 + 0,8 \cdot \beta_1.$$

- при $\beta < 0,65$

$$k_{\beta 1} = 0,2 + 0,85 \cdot \beta_1.$$

$$k'_{\beta 1} = 1,1 \cdot \beta_1.$$

Висота частини пазу, зайнятої обмоткою (рис. 2.1 і 2.3)

$$h_1 = h_{п1} - h_{ш1} - h_{k1} - h_2 - h_4. \quad (5.4)$$

Для цієї формули значення розмірів частин обмоток та пазу визначають за таблицею 5.1 [6].

Таблиця 5.1 – Розміри пазів статора

Форма паза статора	Висоти, мм			
	h	h_{k1}	h_2	h_3, h_4
Напівзакритий	50– 132	0,7	0,6	0
	160– 250	1,0		0,4
	280– 315	3,0		0,4
Напіввідкритий та відкритий	280– 355	3,0	1,9	1,0

Коефіцієнт провідності розсіювання для трапецеїдального напівзакритого паза

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_2} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_2 + 2 \cdot b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} + \frac{h_2}{b_2} \right) \cdot k'_{\beta 1}. \quad (5.5)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання для прямокутного напіввідкритого паза

$$\lambda_{п1} = \frac{h_3}{4 \cdot b_{п1}} + \frac{h_1 - h_3}{3 \cdot b_{п1}} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{п1} + 2 \cdot b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} + \frac{h_2}{b_{п1}} \right) \cdot k'_{\beta 1}. \quad (5.6)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання для прямокутного відкритого паза

$$\lambda_{п1} = \frac{h_3}{4 \cdot b_{п1}} + \frac{h_1 - h_3}{3 \cdot b_{п1}} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{h_{k1} + h_{ш1} + h_2}{b_{п1}} \right) \cdot k'_{\beta 1}. \quad (5.7)$$

Коефіцієнт впливу відкритої конфігурації пазів статора на складову диференціального розсіювання

$$k_{ш1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{ш1}^2}{t_{1min} \cdot \delta}. \quad (5.8)$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіяння

$$\lambda_{d1} = \frac{0,9 \cdot (t_{1min} \cdot k_{o61})^2 \cdot k_{p1} \cdot k_{ш1} \cdot k_{d1}}{\delta \cdot k_{\delta}}, \quad (5.9)$$

де k_{p1} – коефіцієнт, який враховує демпфуючу реакцію струмів, що наведені в обмотці короткозамкнутого ротора вищими гармоніками поля статора (табл. 5.2);

k_{d1} – коефіцієнт диференційного розсіяння статора, який чисельно дорівнює відношенню суми ЕРС, наведених вищими гармоніками поля статора, до ЕРС, наведеною першою гармонікою поля статора (табл. 5.3).

Для двигуна із фазним ротором $k_{p1} = 1$, для двигуна із короткозамкнутим ротором значення коефіцієнта k_{p1} визначається за табл.5.2. У таблиці в чисельнику наведені значення при скосі пазів $b_c=t_2$, а у знаменнику – при відсутності скосу пазів. Для значень z_2/p , що відрізняються від наведених у таблиці або при дробному q_1 коефіцієнт k_{p1} необхідно визначати інтерполяцією.

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнта k_{p1}

q_1	k_{p1} при наступних 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	–	–	–	$\frac{0,75}{0,69}$	$\frac{0,72}{0,67}$	$\frac{0,70}{0,65}$	–
6	–	–	–	$\frac{0,70}{0,62}$	$\frac{0,66}{0,60}$	$\frac{0,62}{0,58}$	–
8	–	–	–	–	–	$\frac{0,53}{0,47}$	$\frac{0,51}{0,46}$

Примітка: Дані у чисельнику приймаються при наявності скосу пазів, дані у знаменнику приймаються при відсутності скосу пазів. Якщо значення z_2/p відрізняються від приведених у таблиці, отримати k_{p1} отримують інтерполяцією наведених значень.

Таблиця 5.3 – Значення коефіцієнта $k_{д1}$

q_1	$k_{д1}$		
	Одношарова з діаметральним кроком	Двошарова обмотка з укороченим кроком для ротора	
		Короткозамкнутого	Фазного
1,5	–	0,045	0,470
2,0	0,0285	0,0235	0,0235
2,5	–	0,017	0,0180
3,0	0,0141	0,0111	0,0111
4,0	0,0089	0,0062	0,0062
5,0	0,0065	0,0043	0,0043
6,0	0,0052	0,0030	0,0030
8,0	–	0,0021	0,0021

Полюсний поділ, мм

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p}. \quad (5.10)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta_1 \cdot \tau). \quad (5.11)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}. \quad (5.12)$$

Індуктивний опір обмотки фази статора, Ом

$$x_1 = \frac{1,58 \cdot f \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8}. \quad (5.13)$$

Індуктивний опір обмотки фази статора у в. о.

$$x'_1 = \frac{x_1 \cdot I_1}{U_1}. \quad (5.14)$$

Перевірка правильності визначення

$$x'_1 = \frac{0,39 \cdot D_1^2 \cdot A_1^2 \cdot \lambda_1 \cdot l_1 \cdot 10^{-7}}{m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot z_1}. \quad (5.15)$$

5.2 Опір обмотки ротора з овальними напівзакритими і закритими пазами

Активні опори стрижня клітки при 20°C, Ом

$$r_{\text{ст}} = \frac{l_2}{\rho_{\text{a20}} \cdot S_{\text{ст}} \cdot 10^3}. \quad (5.16)$$

де ρ_{a20} – питома електрична провідність алюмінію при 20°C, при використанні для заливання клітки ротора алюмінію А5 $\rho_{\text{a20}}=27$ См/мкм, при використанні алюмінієвого сплаву АКМ12– 4 $\rho_{\text{a20}}=15$ См/мкм.

При $z_2/2p < 6$ коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня

$$k_{\text{пр2}} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{z_2}\right). \quad (5.17)$$

При $z_2/2p \geq 6$ коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня

$$k_{\text{пр2}} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot p}{z_2}. \quad (5.18)$$

Опір короткозамкнених кілець приведений до струму стрижня при 20°C, Ом

$$r_{\text{кл}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{\text{клсп}}}{\rho_{\text{a20}} \cdot z_2 \cdot S_{\text{кл}} \cdot k_{\text{пр2}}^2 \cdot 10^3}. \quad (5.19)$$

Центральний кут скосу пазів

$$\alpha_{\text{ск}} = 2 \cdot p \cdot t_1 \cdot \frac{\beta_{\text{ск1}}}{D_1}, \quad (5.20)$$

де $\beta_{\text{ск1}}$ – коефіцієнт скосу у долях зубцевої поділки (приймається від 0 до 1,5). При відсутності скосу пазів $\beta_{\text{ск1}} = 0$.

Коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора до обмотки статора

$$k_{\text{пр1}} = \frac{4 \cdot m_1}{z_2} \cdot \left(\frac{w_1 \cdot k_{\text{о61}}}{k_{\text{ск}}} \right)^2, \quad (5.21)$$

де $k_{\text{ск}}$ – визначається за рис. 5.1.

Активний опір обмотки ротора при 20°C, приведенне до обмотки статора, Ом

$$r'_2 = k_{\text{пр1}} \cdot (r_{\text{ст}} + r_{\text{кл}}). \quad (5.22)$$

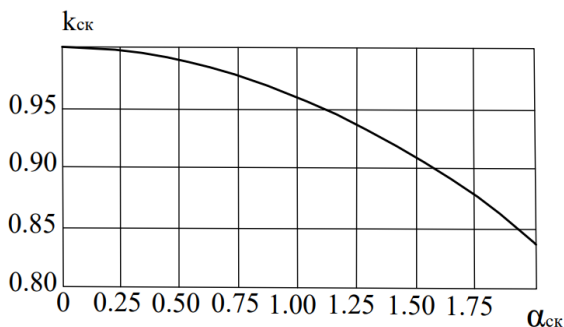


Рисунок 5.1 – Графік до визначення коефіцієнта $k_{ск}$

Активний опір обмотки ротора при 20°C, приведене до обмотки статора у в. о.

$$r'_{2*} = \frac{r'_2 \cdot I_1}{U_1}. \quad (5.23)$$

Струм стрижня ротора для робочого режиму, А

$$I_2 = \frac{2 \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot P_2}{z_2 \cdot U_1} \cdot \frac{(0,2 + 0,8 \cdot \cos\varphi)}{\eta \cdot \cos\varphi}. \quad (5.24)$$

Коефіцієнт провідності розсіяння для овального напівзакритого паза ротора

$$\lambda_{п2} = \frac{h_{шп}}{b_{шп}} + \frac{h_{1p} + 0,8 \cdot r_{2p}}{6 \cdot r_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1p}^2}{2 \cdot S_{ст}}\right)^2 + \dots \quad (5.25)$$

$$\dots + 0,66 - \frac{b_{шп}}{4 \cdot r_{1p}}.$$

Коефіцієнт провідності розсіяння для овального закритого пазаротора

$$\lambda_{п2} = \frac{h_{1p} + 0,8 \cdot r_{2p}}{6 \cdot r_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1p}^2}{2 \cdot S_{ст}}\right)^2 + \dots \quad (5.26)$$

$$\dots + 1,12 \cdot \frac{h_{2p}}{I_2} \cdot 10^3 + 0,66 - \frac{b_{шп}}{4 \cdot r_{1p}} + 0,3.$$

Кількість пазів ротора на полюс та фазу

$$q_2 = \frac{z_2}{2 \cdot p \cdot m}. \quad (5.27)$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання ротора

$$\lambda_{d2} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot k_{d2}}{\delta \cdot k_{\delta}} \cdot \left(\frac{z_2}{6 \cdot p} \right)^2. \quad (5.28)$$

dek_{d2} – визначають за рис. 5.2.

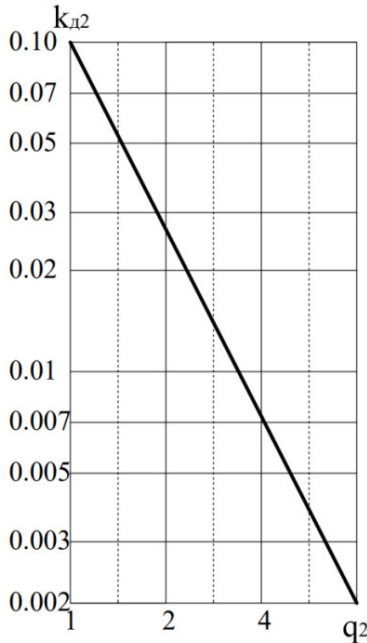


Рисунок 5.2 – Визначення коефіцієнта k_{d2}

Коефіцієнт провідності розсіювання короткозамкнених кілець

$$\lambda_{кл} = \frac{2,9 \cdot D_{клср}}{l_2 \cdot z_2 \cdot k_{пр2}^2} \cdot \log \left(\frac{2,35 \cdot D_{клср}}{h_{кл} + l_{кл}} \right). \quad (5.29)$$

Відносний скос пазів ротора, у долях зубцевого поділу ротора

$$\beta_{ск2} = \frac{\beta_{ск1} \cdot t_1}{t_2}. \quad (5.30)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання скосу пазів

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2 \cdot \beta_{ск2}^2}{9,5 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{нас}}. \quad (5.31)$$

Коефіцієнт провідності розсіяння обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}. \quad (5.32)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, Ом

$$x_2 = 7,9 \cdot f \cdot l_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9}. \quad (5.33)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, Ом

$$x'_2 = k_{пр1} \cdot x_2. \quad (5.34)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора у в. о.

$$x'_{2*} = \frac{x'_2 \cdot I_1}{U_1}. \quad (5.35)$$

Про правильність розрахунку можна робити висновок по відношенню

$$\frac{x_1}{x'_2} = 0,7 \dots 1,0.$$

5.3 Опір обмотки ротора з лопатковими пазами

Розрахунок опорів обмотки короткозамкненого ротора із лопатковими пазами проводять окремо для верхньої частини паза (має індекс «в») і для нижньої частини паза (має індекс «н»).

Активний опір верхньої частини стрижня при 20°C, Ом

$$r_{ств} = \frac{l_2}{\rho_{a20} \cdot S_{ств} \cdot 10^3}. \quad (5.36)$$

де ρ_{a20} – питома електрична провідність алюмінію при 20°C, при використанні для заливання клітки ротора алюмінію А5 $\rho_{a20}=27$ См/мкм, при використанні алюмінієвого сплаву АКМ12– 4 $\rho_{a20}=15$ См/мкм.

Опір короткозамкнених кілець приведений до струму стрижня при 20°C, Ом

$$r_{кл} = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{клср}}{\rho_{a20} \cdot z_2 \cdot S_{кл} \cdot k_{пр2}^2 \cdot 10^3}. \quad (5.37)$$

Активний опір верхньої частини стрижня, приведенне до статора, при 20°C, Ом

$$r'_{ств} = k_{пр1} \cdot r_{ств}. \quad (5.38)$$

Активний опір нижньої частини стрижня при 20°C, Ом

$$r_{\text{стн}} = \frac{l_2}{\rho_{\text{а20}} \cdot S_{\text{стн}} \cdot 10^3}. \quad (5.39)$$

Активний опір нижньої частини стрижня, приведене до статора, при 20°C, Ом

$$r'_{\text{стн}} = k_{\text{пр1}} \cdot r_{\text{стн}}. \quad (5.40)$$

Активний опір коротко замикаючих кілець, приведений до статора, при 20°C, Ом

$$r'_o = k_{\text{пр1}} \cdot r_{\text{кл}}. \quad (5.41)$$

Активний результуючий опір ротора при 20°C, Ом

$$r'_2 = r'_o + \frac{r'_{\text{ств}} \cdot r'_{\text{стн}}}{r'_{\text{ств}} + r'_{\text{стн}}}. \quad (5.42)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання нижньої частини клітки

$$\lambda_{2\text{н}} = \left(\frac{h_{1p} + 0,8 \cdot r_{2p}}{6 \cdot r_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1p}^2}{2 \cdot S_{\text{стн}}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_p}{4 \cdot r_{1p}} \right) + \dots \dots + \frac{h_p - 0,18}{2 \cdot b_p}. \quad (5.43)$$

Струм верхньої та нижньої частини стрижня ротора

$$I_2 = \frac{2 \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot P_2}{z_2 \cdot U_1} \cdot \frac{(0,2 + 0,8 \cdot \cos\varphi) \cdot 10^3}{\eta \cdot \cos\varphi}. \quad (5.44)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання взаємної індукції нижнього та верхнього пазів

$$\lambda_{\text{нв}} = \frac{1,12 \cdot h_{2p} \cdot 10^3}{I_2} + \frac{h_p + 0,1 \cdot b_p}{2 \cdot b_p} + 1,09. \quad (5.45)$$

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання ротора

$$\lambda_{\text{д2}} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot k_{\text{д2}}}{\delta \cdot k_{\delta}} \cdot \left(\frac{z_2}{6 \cdot p} \right)^2, \quad (5.46)$$

де $k_{\text{д2}}$ – визначають за рис. 5.2.

Коефіцієнт провідності розсіювання короткозамкнених кілець

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,9 \cdot D_{\text{клср}}}{l_2 \cdot z_2 \cdot k_{\text{пр2}}^2} \cdot \log \left(\frac{2,35 \cdot D_{\text{клср}}}{h_{\text{кл}} + l_{\text{кл}}} \right)^2. \quad (5.47)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання загального ланцюга ротора

$$\lambda_{2o} = \lambda_{\text{нв}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{кл}}. \quad (5.48)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання

$$\lambda'_{2н} = \frac{\lambda_{2н} \cdot l_2 \cdot z_1 \cdot k_{об1}^2}{l_1 \cdot z_2}. \quad (5.49)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання

$$\lambda'_{2о} = \frac{\lambda_{2о} \cdot l_2 \cdot z_1 \cdot k_{об1}^2}{l_1 \cdot z_2}. \quad (5.50)$$

Індуктивний опір нижньої частини клітки, приведений до статора, Ом

$$x'_{н} = \frac{x_1 \cdot \lambda'_{2н}}{\lambda_1}. \quad (5.51)$$

Індуктивний опір загального ланцюга ротора, приведений до статора, Ом

$$x'_{о} = \frac{x_1 \cdot \lambda'_{2о}}{\lambda_1}. \quad (5.52)$$

Індуктивний результуючий опір, Ом

$$x'_{2} = x'_{о} + x'_{н} \cdot \left(\frac{S_{стн}}{S_{стн} + S_{ств}} \right)^2. \quad (5.53)$$

Активний опір обмотки ротора при 20°C, приведенне до обмотки статора в умовних одиницях

$$r'_{2*} = \frac{r'_{2} \cdot I_1}{U_1}. \quad (5.54)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора у в. о.

$$x'_{2*} = \frac{x'_{2} \cdot I_1}{U_1}. \quad (5.55)$$

Про правильність розрахунку можна робити висновок по відношенню

$$\frac{x_1}{x'_{2}} = 0,7 \dots 1,0.$$

5.4 Опори обмоток перетвореної схеми заміщення двигуна

Для розрахунку режимів роботи асинхронного двигуна зручно користуватись схемою заміщення двигуна з винесеним на жазими намагнічуючого контуру. При цьому опори обмоток r_1 ,

x_1, r'_2, x'_2 , визначені для Т- подібної схеми заміщення, мають бути перетворені шляхом множення на деякі комплексні коефіцієнти. Крім того, активні опори статора та ротора мають бути помножені на коефіцієнт m_T , тобто приведені до розрахункової робочої температури, яка відповідає класу нагрівостійкості ізоляційних матеріалів та обмоткових проводів.

Для класу нагрівостійкості ізоляції В

$$m_T = 1 + 0,004 \cdot (75 - 20). \quad (5.56)$$

Для класу нагрівостійкості ізоляції F, H

$$m_T = 1 + 0,004 \cdot (115 - 20). \quad (5.57)$$

Коефіцієнт розсіяння статора

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_M}. \quad (5.58)$$

Коефіцієнт опору статора

$$\rho_1 = \frac{r_1 \cdot m_T}{x_1 + x_M}. \quad (5.59)$$

Значення коефіцієнта τ_1 дозволяє визначити необхідність повторного розрахунку магнітного ланцюга. Якщо коефіцієнт насичення $k_{\text{нас}} \geq 1,7$ та $\tau_1 \geq 0,05$ необхідно визначити ЕРС неробочого ходу

$$E_0 = \frac{U_1}{(1 + \tau_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}. \quad (5.60)$$

Якщо значення E_0 відрізняється від розрахованого раніше E більш ніж на 3%, то повторюють розрахунок магнітного ланцюга при магнітних індукціях $B_\delta, B_{\delta 1}, B_{\delta 2}, B_{\delta 3}$, змінених пропорційно відношенню E_0/E .

Перетворені опори обмоток, Ом

$$r'_1 = m_T \cdot r_1, \quad (5.61)$$

$$x'_1 = x_1 \cdot (1 + \tau_1) \cdot \left(1 + \frac{r_1 \cdot \rho_1}{x_1}\right), \quad (5.62)$$

$$r''_2 = m_T \cdot r'_2 \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2), \quad (5.63)$$

$$x''_2 = x'_2 \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2). \quad (5.64)$$

6 РЕЖИМ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ТА НОМІНАЛЬНИЙ РЕЖИМ

6.1 Режим неробочого ходу

Для режиму неробочого ходу мають бути визначені струм, втрати, а також коефіцієнт потужності.

Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні, А

$$I_{cp} = \frac{U_1}{x_m \cdot (1 + \tau_1) \cdot (1 + \rho_1^2)}. \quad (6.1)$$

Електричні втрати в обмотці статора при синхронному обертанні, Вт

$$P_{cm1} = m \cdot I_{cp}^2 \cdot r'_1 \cdot (1 + \rho_1^2). \quad (6.2)$$

Розрахункова маса сталі зубців статора при трапецієдальних пазах, кг

$$m_{z1} = 7,8 \cdot z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{п1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6}. \quad (6.3)$$

Розрахункова маса сталі зубців статора при прямокутних пазах, кг

$$m_{z1} = 7,8 \cdot z_1 \cdot b_{z1cp} \cdot h_{п1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6}. \quad (6.4)$$

Магнітні втрати в зубцях статора для сталі марки 2013, Вт

$$P_{z1} = 4,4 \cdot B_{z1cp}^2 \cdot m_{z1}. \quad (6.5)$$

Магнітні втрати в зубцях статора для сталі марки 2312, Вт

$$P_{z1} = 3 \cdot B_{z1cp}^2 \cdot m_{z1}. \quad (6.6)$$

Маса сталі в спинці статора, кг

$$m_{c1} = 7,8 \cdot \pi \cdot (D_{н1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6}. \quad (6.7)$$

Магнітні втрати в спинці статора для сталі марки 2013, Вт

$$P_{c1} = 4,4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1}. \quad (6.8)$$

Магнітні втрати в спинці статора для сталі марки 2312, Вт

$$P_{c1} = 3 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1}. \quad (6.9)$$

Сумарні магнітні втрати в осерді статора, Вт

$$P_{c\Sigma} = P_{z1} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sqrt{0,1 \cdot t_1 \cdot (k_\delta - 1)^2} \right] + P_{c1}. \quad (6.10)$$

Механічні втрати визначаються з урахуванням способу захисту та способу охолодження, Вт:

- IP23 та засобі охолодження IC01 без радіальних вентиляційних каналів

$$P_{\text{мх}\Sigma} = k_{\text{мх}} \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100}\right)^3. \quad (6.11)$$

де $k_{\text{мх}} = 5,5$ при $2p=2$;

$k_{\text{мх}} = 6,5$ при $2p \geq 4$;

- IP23 та засобі охолодження IC01 з радіальними вентиляційними каналами

$$P_{\text{мх}\Sigma} = (n_k + 11) \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100}\right)^3. \quad (6.12)$$

- IP44 та засобі охолодження IC0141

$$P_{\text{мх}\Sigma} = k_{\text{мх}} \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{\text{H1}}}{100}\right)^4. \quad (6.13)$$

де $k_{\text{мх}} = 1,3 \cdot \left(1 - \frac{D_{\text{H1}}}{1000}\right)$ при $2p=2$;

$k_{\text{мх}} = 1$ при $2p \geq 4$;

- IP44 та засобі охолодження IC0151

$$P_{\text{мх}\Sigma} = (n_k + 11) \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100}\right)^3 + \dots \quad (6.14)$$

$$\dots + \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,6 \cdot D_{\text{H1}}}{100}\right)^4.$$

Активна складова струму неробочого ходу, А

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{см1}} + P_{\text{с}\Sigma} + P_{\text{мх}\Sigma}}{m \cdot U_1}. \quad (6.15)$$

Струм НХ, А

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{\text{ср}}^2}. \quad (6.16)$$

Коефіцієнт потужності при НХ

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0}. \quad (6.17)$$

6.2 Номінальний режим

Параметри номінального режиму роботи та робочі характеристики можуть бути отримані двома способами: аналітично та за круговою діаграмою. Стандарт [16] визначає основні робочі характеристики та допуски для електричних

машин. Використання комп'ютерних пакетів програм математичного розрахунку дозволяють із високою точністю використовувати аналітичний метод. Методика аналітичного розрахунку бере за основу перетворену схему заміщення асинхронного двигуна з еквівалентним опором R_H , яка наведена на рисунку 6.1.

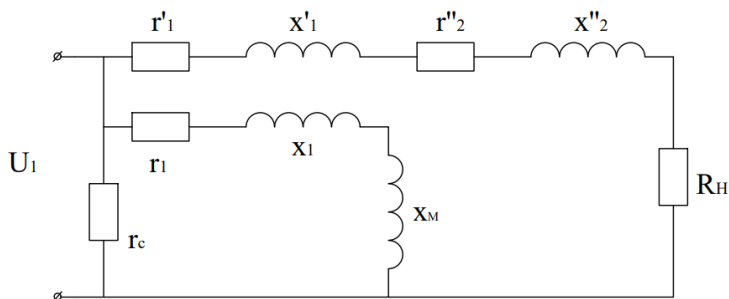


Рисунок 6.1 – Перетворена схема заміщення асинхронного двигуна із еквівалентним опором R_H

Послідовність розрахунку номінального режиму роботи викладена у (6.18)– (6.45).

Активний опір КЗ, Ом

$$r_k = r'_1 + r''_2. \quad (6.18)$$

Індуктивний опір КЗ, Ом

$$x_k = x'_1 + x''_2. \quad (6.19)$$

Повний опір КЗ, Ом

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}. \quad (6.20)$$

Додаткові втрати при номінальному навантаженні, Вт

$$P_d = 0.005 \cdot \frac{P_2}{\eta}. \quad (6.21)$$

Механічна потужність двигуна, Вт

$$P'_2 = P_2 + P_{\text{мх}\Sigma} + P_d. \quad (6.22)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення, Ом

$$R_H = \frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot P'_2} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot P'_2} - r_k\right)^2 - z_k^2}. \quad (6.23)$$

Повний опір схеми заміщення, Ом

$$z_{\text{н}} = \sqrt{(R_{\text{н}} + r_k)^2 + x_k^2}. \quad (6.24)$$

Попередні розрахунки вірні, якщо

$$\frac{R_{\text{н}}}{z_{\text{н}}^2} = \frac{P'_2}{m \cdot U_1^2}. \quad (6.25)$$

Ковзання для номінального режиму

$$S_{\text{н}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{н}}}{r''_2}}. \quad (6.26)$$

Активна складова струму статора при синхронному обертанні, А

$$I_{ca} = \frac{P_{c\Sigma} + P_{cm1}}{m \cdot U_1}. \quad (6.27)$$

Струм ротора, А

$$I''_2 = \frac{U_1}{z_{\text{н}}}. \quad (6.28)$$

Активна складова струму статора, А

$$I_{a1} = I_{ca} + I''_2 \cdot \left(\frac{R_{\text{н}} + r_k}{z_{\text{н}}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_k}{z_{\text{н}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \quad (6.29)$$

Реактивна складова струму статора, А

$$I_{p1} = I_{cp} + I''_2 \cdot \left(\frac{x_k}{z_{\text{н}}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{R_{\text{н}} + r_k}{z_{\text{н}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \quad (6.30)$$

Повний струм статора, А

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}. \quad (6.31)$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{I_{a1}}{I_1}. \quad (6.32)$$

Лінійне навантаження статора, А/см

$$A_1 = \frac{10 \cdot I_1 \cdot N_{\text{п1}}}{a_1 \cdot t_1}. \quad (6.33)$$

Густина струму в обмотці статора, А/мм²

$$J_1 = \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1}. \quad (6.34)$$

Лінійне навантаження ротора, А/см

$$A_2 = A_1 \cdot I''_2 \cdot (1 + \tau_1) \cdot \frac{\sqrt{1 + \rho_1^2}}{I_1 \cdot k_{\text{СК}}} \cdot \frac{k_{\text{об1}}}{k_{\text{об2}}}. \quad (6.35)$$

де $k_{\text{об2}} = 1$ – для короткозамкненого ротора.

Струм в стрижні короткозамкненого ротора, А

$$I_{\text{СТ}} = 2 \cdot I''_2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot (1 + \tau_1) \cdot \frac{\sqrt{1 + \rho_1^2}}{z_2 \cdot k_{\text{СК}}}. \quad (6.36)$$

Густина струму в стрижні короткозамкненого ротора, А/мм²

$$J_{\text{СТ}} = \frac{I_{\text{СТ}}}{S_{\text{СТ}}}. \quad (6.37)$$

Струм у короткозамикальному кільці, А

$$I_{\text{КЛ}} = \frac{I_{\text{СТ}}}{k_{\text{пр2}}}. \quad (6.38)$$

Електричні втрати в обмотці статора та ротора відповідно, Вт

$$P_{\text{М1}} = m \cdot I_1^2 \cdot r'_1, \quad (6.39)$$

$$P_{\text{М2}} = m \cdot I''_2^2 \cdot r''_2. \quad (6.40)$$

Сумарні втрати, Вт

$$P_{\Sigma} = P_{\text{М1}} + P_{\text{М2}} + P_{\text{сΣ}} + P_{\text{мхΣ}} + P_{\text{д}}. \quad (6.41)$$

Потужність, яка підведена до двигуна, Вт

$$P_1 = P_2 + P_{\Sigma}. \quad (6.42)$$

Коефіцієнт корисної дії, %

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1}\right) \cdot 100\%. \quad (6.43)$$

Правильність розрахунків підтверджується виразами (6.44) і (6.45), Вт

$$P_1 = m \cdot I_{\text{а1}} \cdot U_1. \quad (6.44)$$

$$P_2 = m \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \frac{\eta}{100} \cdot \cos\varphi_{\text{н}}. \quad (6.45)$$

6.3 Побудова робочих характеристик

Робочими характеристики називають залежності $I_1=f(P_2)$; $\eta=f(P_2)$; $\cos\varphi=f(P_2)$; $s=f(P_2)$. Робочі характеристики можуть бути розраховані аналітично. Порядок розрахунку робочих

характеристик проводиться за допомогою методики, викладеної у розділі 6.2 за формулами (6.21)– (6.43) для значень $P_2 = 0,25 \cdot P_2$; $0,50 \cdot P_2$; $0,75 \cdot P_2$; $1,00 \cdot P_2$; $1,25 \cdot P_2$. Приклад побудови робочих характеристик наведено на рисунку 6.2. При побудові слід мати на увазі, що при $P_2 = 0$; $I_1 = I_0$; $\cos\varphi = \cos\varphi_0$; $\eta = 0$; $s = s_0$ (індекс 0 відповідає режиму неробочого ходу).

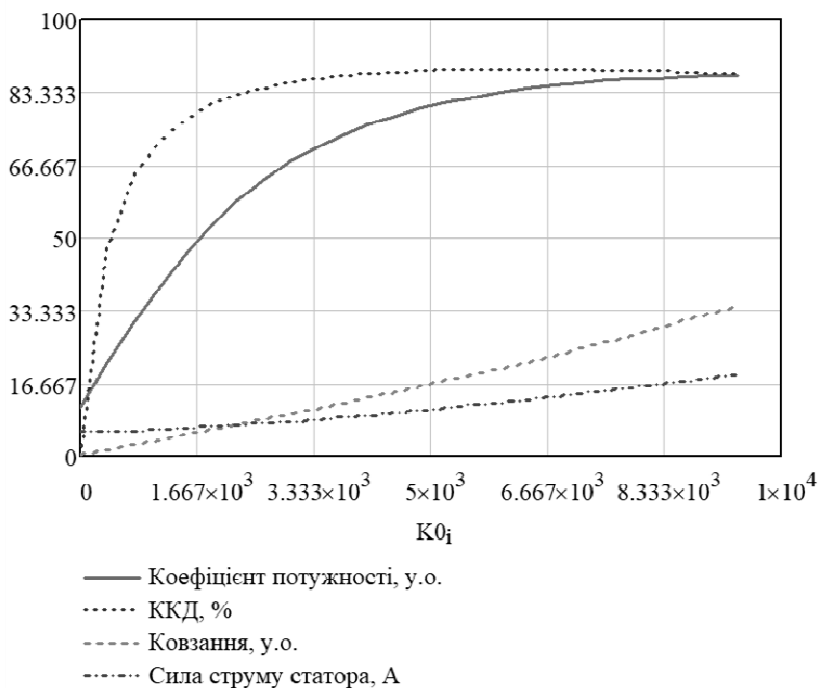


Рисунок 6.2 – Результати побудови робочих характеристик у програмному засобі MathCAD

6.4 Максимальний момент

Максимальний момент асинхронного двигуна має бути не меншим, ніж вказано у [8]. При навантаженнях, що відповідають моментам, що близькі до максимальних, струми статора та

ротора перевищують номінальні у 2– 3 рази. Внаслідок виникнення значних струмів виникає насичення шляхів потоків розсіяння, що викликає зменшення індуктивних опорів статора та ротора.

Для урахування впливу потоків розсіяння усі розраховані магнітні провідності статора та ротора поділяють на дві частини:

- провідності, що залежать від насичення, провідності диференційного розсіяння статора та ротора;

- провідності, що не залежать від насичення, тобто постійні – частина провідності пазового розсіяння, розсіяння лобових частин обмоток статора, провідності розсіяння короткозамикальних кілець та провідність розсіяння скосу пазів.

Змінна частина коефіцієнта статора для трапецеїдального напівзакритого паза статора

$$\lambda_{п13м} = k'_{\beta 1} \cdot \left(\frac{3 \cdot h_k}{b_2 + 2 \cdot b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} \right). \quad (6.46)$$

Змінна частина коефіцієнта статора для прямокутного напіввідкритого паза статора

$$\lambda_{п13м} = k'_{\beta 1} \cdot \left(\frac{3 \cdot h_k}{b_{п1} + 2 \cdot b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} \right). \quad (6.47)$$

Змінна частина коефіцієнта статора для прямокутного відкритого паза статора

$$\lambda_{п13м} = \frac{k'_{\beta 1} \cdot (h_k + h_{ш1})}{b_{п1}}. \quad (6.48)$$

Складова коефіцієнта провідності розсіяння статора, яка залежить від насичення

$$\lambda_{13м} = \lambda_{п13м} + \lambda_{д1}. \quad (6.49)$$

Змінна частина коефіцієнта ротора при овальному напівзакритому пазу ротора

$$\lambda_{п23м} = \frac{h_{шр}}{b_{шр}}. \quad (6.50)$$

Змінна частина коефіцієнта ротора для овального закритого паза ротора і для лопаткового закритого паза ротора

$$\lambda_{п2зм} = \frac{1.12 \cdot h_{2p} \cdot 10^3}{I_2}. \quad (6.51)$$

Складова коефіцієнта провідності розсіяння ротора, яка залежить від насичення

$$\lambda_{2зм} = \lambda_{п2зм} + \lambda_{д2}. \quad (6.52)$$

Індуктивний опір розсіяння двигуна, який залежить від насичення $x_{зм}$ та не залежить від насичення $x_{пос}$ знаходять у залежності від форми пазів статора і ротора. Змінне значення індуктивного опору розсіяння двигуна для будь-якої форми пазів статора і ротора окрім лопаткової, Ом

$$x_{зм} = \frac{x'_1 \cdot \lambda_{1зм}}{\lambda_1} + \frac{x''_2 \cdot \lambda_{2зм}}{\lambda_2}. \quad (6.53)$$

Постійне значення індуктивного опору розсіяння двигуна для будь-якої форми пазів статора і ротора окрім лопаткової, Ом

$$x_{пос} = \frac{x'_1 \cdot (\lambda_1 - \lambda_{1зм})}{\lambda_1} + \frac{x''_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_{2зм})}{\lambda_2}. \quad (6.54)$$

Для лопаткового паза ротора порядок розрахунку індуктивних опорів розсіяння наступний:

- перетворений індуктивний опір загального ланцюга ротора, приведене до статора, Ом

$$x''_0 = x'_0 \cdot (1 + \tau_1)^2, \quad (6.55)$$

- перетворений індуктивний опір нижньої частини клітки ротора, Ом

$$x''_н = x'_н \cdot (1 + \tau_1)^2, \quad (6.56)$$

- індуктивний опір розсіяння двигуна, який залежить від насичення, Ом

$$x_{зм} = \frac{x'_1 \cdot \lambda_{1зм}}{\lambda_1} + \frac{x''_0 \cdot \lambda_{2зм}}{\lambda_{20}}, \quad (6.57)$$

- індуктивний опір розсіяння двигуна, який не залежить від насичення, Ом

$$x_{\text{пос}} = \frac{x'_1 \cdot (\lambda_1 - \lambda_{13\text{м}})}{\lambda_1} + \frac{x''_0 \cdot (\lambda_{20} - \lambda_{23\text{м}})}{\lambda_{20}} + \dots$$

$$\dots + x''_n \cdot \left(\frac{S_{\text{стн}}}{S_{\text{стн}} + S_{\text{стб}}} \right)^2. \quad (6.58)$$

Струм ротора, який відповідає максимальному моменту, при будь-якій формі пазів статора, при відкритих або напівзакритих пазах ротора

$$I''_{\text{м2}} = \frac{U_1}{\sqrt{2 \cdot \left[r'^2_1 + (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{3\text{м}})^2 + \right.}} - \dots$$

$$\left. + r'_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{3\text{м}}) \right]} \quad (6.59)$$

$$\dots - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot [r'_1 + 2 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{3\text{м}})] \cdot x_{3\text{м}}}{2 \cdot N_{\text{п1}} \cdot \left[r'^2_1 + (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{3\text{м}})^2 + \right.}$$

$$\left. + r'_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{3\text{м}}) \right]}.$$

Струм ротора, який відповідає максимальному моменту, при будь-якій формі пазів статора, при овальних закритих і лопаткових пазах ротора

$$I''_{\text{м2}} = \frac{U_1}{\sqrt{2 \cdot \left[r'^2_1 + (x_{\text{пос}} + 0,025 \cdot x_{3\text{м}})^2 + \right.}} - \dots$$

$$\left. + r'_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,025 \cdot x_{3\text{м}}) \right]} \quad (6.60)$$

$$\dots - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot [r'_1 + 2 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,025 \cdot x_{3\text{м}})] \cdot x_{3\text{м}}}{2 \cdot N_{\text{п1}} \cdot \left[r'^2_1 + (x_{\text{пос}} + 0,025 \cdot x_{3\text{м}})^2 + \right.}$$

$$\left. + r'_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,025 \cdot x_{3\text{м}}) \right]}.$$

Повний опір схеми заміщення при максимальному моменті, Ом

$$z_{\text{м}} = \frac{U_1}{I''_{\text{м2}}}. \quad (6.61)$$

Повний опір схеми заміщення при нескінченно великому ковзанні, Ом

$$z_{\infty} = 0,5 \cdot \left(\sqrt{r'_{1^2} + 2 \cdot z_M^2 - r'_{1^2}} \right). \quad (6.62)$$

Еквівалентний опір схеми заміщення при максимальному моменті, Ом

$$R_M = z_{\infty} + r'_{1^2}. \quad (6.63)$$

Кратність максимального моменту

$$\frac{M_{max}}{M_H} = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot R_M \cdot P_2}. \quad (6.64)$$

Ковзання при максимальному моменті

$$s_M = \frac{r''_{2^2}}{z_{\infty}}. \quad (6.65)$$

6.5 Початковий пусковий струм та початковий пусковий момент

Пускові властивості асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором характеризуються значеннями початкового пускового моменту та струму і регламентуються стандартом [8]. При розрахунку необхідно врахувати вплив витіснення струму в пазах короткозамкненої обмотки ротора та насичення шляхів потоків розсіяння в зубцях статора і ротора. Внаслідок витіснення струму збільшується r''_{2^2} та зменшується x''_{2^2} , а у результаті насичення зменшуються x''_{2^2} та x'_{2^2} , тому розрахунок пускового режиму необхідно починати з визначення активних та індуктивних опорів, які відповідають цьому режиму.

6.5.1 Послідовність розрахунку початкового пускового струму та початкового пускового моменту для овального напівзакритого або закритого паза ротора

Висота стрижня клітки ротора для закритих пазів ротора, мм

$$h_{ст} = h_{п2} - h_{шр} - h_{2р}. \quad (6.66)$$

При напівзакритих пазах ротора для формули (6.66) $h_{2р} = 0$.

Приведена висота стрижня ротора для литої алюмінієвої клітки ротора для початкового пускового моменту ($s = 1$)

$$\xi = 0,0735 \cdot h_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\frac{s}{m_{\text{т}}}}. \quad (6.67)$$

Розрахункова глибина проникнення струму в стрижень, мм

$$h_p = \frac{h_{\text{ст}}}{1 + \varphi}. \quad (6.68)$$

де φ – коефіцієнт, визначений за рисунком 6.3.

Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму при $r_{1p} \leq h_p \leq r_{1p} + h_{1p}$, мм

$$b_p = 2 \cdot r_{1p} - \frac{2 \cdot (r_{1p} - r_{2p})}{h_{1p}} \cdot (h_p - r_{1p}). \quad (6.69)$$

Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму при $h_p < r_{1p}$, мм

$$b_p = 2 \cdot \sqrt{r_{1p}^2 - (r_{1p} - h_p)^2}. \quad (6.70)$$

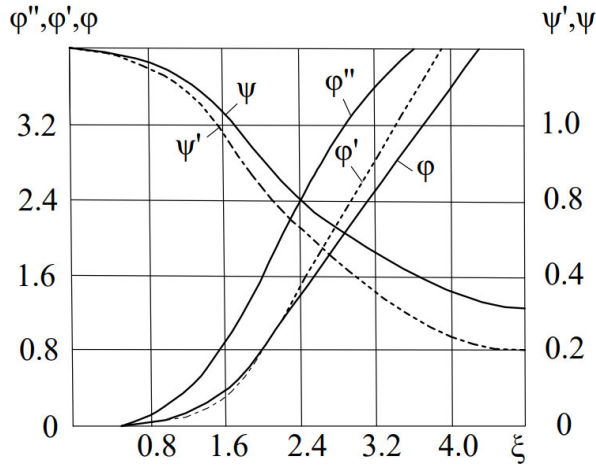


Рисунок 6.3

Площа поперечного перетину стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму при $r_{1p} \leq h_p \leq r_{1p} + h_{1p}$, мм²

$$s_p = \frac{\pi}{2} \cdot r_{1p}^2 + \left(r_{1p} + \frac{b_p}{2} \right) \cdot (h_p - r_{1p}). \quad (6.71)$$

Площа поперечного перетину стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму при $h_p < r_{1p}$, мм²

$$s_p = 0,5 \cdot \left(r_{1p} \cdot \left(\sqrt{b_p^2 + 5,33 \cdot h_p^2} - b_p \right) + b_p \cdot h_p \right). \quad (6.72)$$

Коефіцієнт витіснення струму

$$k_{вт} = \frac{S_{ст}}{S_p}. \quad (6.73)$$

Активний опір стрижня клітки для пускового режиму, Ом

$$r_{стп} = r_{ст} \cdot k_{вт}. \quad (6.74)$$

Активний опір обмотки ротора приведений до обмотки статора, Ом

$$r'_{2п} = k_{пр1} \cdot (r_{стп} + r_{кл}). \quad (6.75)$$

Коефіцієнт провідності розсіяння паза ротора при пуску для овального напівзакритого паза

$$\lambda_{п2п} = \frac{h_{шп}}{b_{шп}} + \psi \cdot \left(\frac{h_{1п} + 0,8 \cdot r_{2п}}{6 \cdot r_{1п}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1п}^2}{2 \cdot S_{ст}} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + 0,66 - \frac{b_{шп}}{4 \cdot r_{1п}} \right), \quad (6.76)$$

де ψ – коефіцієнт, визначений за рисунком 6.3.

Коефіцієнт провідності розсіяння паза ротора при пуску для овального закритого паза

$$\lambda_{п2п} = \frac{1,12 \cdot h_{2п} \cdot 10^3}{I_2} + 0,3 + \dots \\ \dots + \psi \cdot \left(\frac{h_{1п} + 0,8 \cdot r_{2п}}{6 \cdot r_{1п}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1п}^2}{2 \cdot S_{ст}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{шп}}{4 \cdot r_{1п}} \right), \quad (6.77)$$

де ψ – коефіцієнт, визначений за рисунком 6.3.

Коефіцієнт провідності розсіяння обмотки ротора при пуску

$$\lambda_{2п} = \lambda_{п2п} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}. \quad (6.78)$$

Індуктивний опір розсіяння двигуна, яке залежить від насичення, Ом

$$x_{зм} = x'_{1} \cdot \frac{\lambda_{13м}}{\lambda_1} + x''_{2} \cdot \frac{\lambda_{23м}}{\lambda_{2п}}, \quad (6.79)$$

Індуктивний опір розсіяння двигуна, яке не залежить від насичення, Ом

$$x_{\text{пос}} = x'_{1} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{зм}}}{\lambda_1} + x''_{2} \cdot \frac{\lambda_{2\text{п}} - \lambda_{2\text{зм}}}{\lambda_{2\text{п}}}. \quad (6.80)$$

Активний опір короткого замикання при пуску, Ом

$$r_{\text{кп}} = r'_{1} + r'_{2\text{п}} \cdot m_{\text{т}} \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1)^2. \quad (6.81)$$

Струм ротора при пуску при відкритих або напівзакритих пазах ротора, А

$$I''_{\text{п2}} = \frac{U_1}{\sqrt{r_{\text{кп}}^2 + (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{\text{зм}})^2}} - \dots \quad (6.82)$$

$$\dots - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{\text{зм}}) \cdot x_{\text{зм}}}{N_{\text{п1}} \cdot (r_{\text{кп}}^2 + (x_{\text{пос}} + 0,0825 \cdot x_{\text{зм}})^2)}.$$

Струм ротора при пуску при закритих пазах ротора, А

$$I''_{\text{п2}} = \frac{U_1}{\sqrt{r_{\text{кп}}^2 + (x_{\text{пос}} + 0,25 \cdot x_{\text{зм}})^2}} - \dots \quad (6.83)$$

$$\dots - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0,25 \cdot x_{\text{зм}}) \cdot x_{\text{зм}}}{N_{\text{п1}} \cdot (r_{\text{кп}}^2 + (x_{\text{пос}} + 0,25 \cdot x_{\text{зм}})^2)}.$$

Повний опір схеми заміщення при пуску, Ом

$$z_{\text{кп}} = \frac{U_1}{I''_{\text{п2}}}. \quad (6.84)$$

Індуктивний опір схеми заміщення при пуску, Ом

$$x_{\text{кп}} = \sqrt{z_{\text{кп}}^2 - r_{\text{кп}}^2}. \quad (6.85)$$

Активна складова струму статора при пуску, А

$$I_{\text{па1}} = I_{\text{са}} + I''_{\text{п2}} \cdot \left(\frac{r_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right), \quad (6.86)$$

Реактивна складова струму статора при пуску, А

$$I_{\text{пр1}} = I_{\text{ср}} + I''_{\text{п2}} \cdot \left(\frac{x_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{r_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \quad (6.87)$$

Фазний струм статора при пуску, А

$$I_{\text{п1}} = \sqrt{I_{\text{па1}}^2 + I_{\text{пр1}}^2}. \quad (6.88)$$

Кратність початкового пускового струму

$$K_{\Pi} = \frac{I_{\Pi 1}}{I_1}. \quad (6.89)$$

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

$$r''_{2\Pi} = r'_{2\Pi} \cdot m \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2). \quad (6.90)$$

Кратність пускового моменту

$$\frac{M_{\Pi}}{M_H} = m \cdot I''_{\Pi 2} \cdot r''_{2\Pi} \cdot \left(\frac{1 - s_H}{P_2} \right). \quad (6.91)$$

6.5.2 Послідовність розрахунку початкового пускового струму та початкового пускового моменту для лопаткового закритого паза ротора

Висота стрижня клітки ротора, мм

$$h_{\text{ст}} = h_{\Pi 2} - h_{2p}. \quad (6.92)$$

Приведена висота стрижня ротора для литої алюмінієвої клітки ротора

$$\xi = 0,0735 \cdot h_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\frac{s}{m_T}}. \quad (6.93)$$

Розрахункова глибина проникнення струму в нижню частину стрижня, мм

$$h_{pH} = \frac{h_{\text{ст}}}{1 + \varphi} - h_{2p}. \quad (6.94)$$

де φ – коефіцієнт, визначений за рисунком 6.3.

Ширина нижньої частини стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму при $r_{1p} \leq h_{pH} \leq r_{1p} + h_{1p}$, мм

$$b_p = 2 \cdot r_{1p} - \frac{2 \cdot (r_{1p} - r_{2p})}{h_{1p}} \cdot (h_{pH} - r_{1p}). \quad (6.95)$$

Ширина нижньої частини стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму при $h_{pH} < r_{1p}$, мм

$$b_p = 2 \cdot \sqrt{r_{1p}^2 - (r_{1p} - h_{pH})^2}. \quad (6.96)$$

Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму при $r_{1p} \leq h_{pH} \leq r_{1p} + h_{1p}$, мм²

$$s_{pн} = \frac{\pi}{2} \cdot r_{1p}^2 + \left(r_{1p} + \frac{b_{pн}}{2} \right) \cdot (h_{pн} - r_{1p}). \quad (6.97)$$

Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму при $h_{pн} \leq r_{1p}$, мм²

$$s_{pн} = 0,5 \cdot \left(r_{1p} \cdot \left(\sqrt{b_{pн}^2 + 5,33 \cdot h_{pн}^2} - b_{pн} \right) + b_{pн} \cdot h_{pн} \right). \quad (6.98)$$

Коефіцієнт витіснення струму в нижній частині стрижня

$$k_{вгн} = \frac{S_{стн}}{s_{pн}}. \quad (6.99)$$

Активний опір нижньої частини стрижня, приведенне до статора, Ом

$$r'_{стнп} = r'_{стн} \cdot k_{вгн}. \quad (6.100)$$

Активний результуючий опір обмотки ротора приведений до обмотки статора, Ом

$$r'_{2п} = r'_{0} + \frac{r'_{ств} \cdot r'_{стнп}}{r'_{ств} + r'_{стнп}}. \quad (6.101)$$

Коефіцієнт

$$\psi'' = \frac{(h_{п2} - h_{2p}) \cdot \psi - h_p}{h_{п2} - h_{2p} - h_p}. \quad (6.102)$$

Коефіцієнт провідності розсіяння паза ротора нижньої частини клітки

$$\lambda_{2нп} = \psi'' \cdot \left(\frac{h_{1p} + 0,8 \cdot r_{2p}}{6 \cdot r_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1p}^2}{2 \cdot S_{стн}} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + 0,66 - \frac{b_p}{4 \cdot r_{1p}} \right) + \frac{h_p + 0,18}{2 \cdot b_p}. \quad (6.103)$$

Приведений коефіцієнт провідності розсіяння нижньої частини клітки

$$\lambda'_{2нп} = \frac{\lambda_{2нп} \cdot l_2 \cdot z_1 \cdot k_{об}^2}{l_1 \cdot z_2}. \quad (6.104)$$

Індуктивний опір ніжньої частини клітини, приведенне до статора, Ом

$$x'_{нп} = x_1 \cdot \frac{\lambda'_{2нп}}{\lambda_1}. \quad (6.105)$$

Розрахункова глибина проникнення струму у нижній стрижень, мм

$$h_{\text{хн}} = (h_{\text{п2}} - h_{\text{2p}}) \cdot \psi - h_{\text{p}}. \quad (6.106)$$

Ширина нижнього стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму при $r_{1p} \leq h_{\text{хн}} \leq r_{1p} + h_{1p}$, мм

$$b_{\text{хн}} = 2 \cdot r_{1p} - \frac{2 \cdot (r_{1p} - r_{2p}) \cdot (h_{\text{хн}} - r_{1p})}{h_{1p}}. \quad (6.107)$$

Ширина нижнього стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму при $h_{\text{хн}} < r_{1p}$, мм

$$b_{\text{хн}} = 2 \cdot \sqrt{r_{1p}^2 - (r_{1p} - h_{\text{хн}})^2}. \quad (6.108)$$

Площа поперечного перетину нижнього стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму при $r_{1p} \leq h_{\text{хн}} \leq r_{1p} + h_{1p}$, мм²

$$s_{\text{хн}} = \frac{\pi}{2} \cdot r_{1p}^2 + \left(r_{1p} + \frac{b_{\text{хн}}}{2}\right) \cdot (h_{\text{хн}} - r_{1p}). \quad (6.109)$$

Площа поперечного перетину нижнього стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму при $h_{\text{хн}} < r_{1p}$, мм²

$$s_{\text{хн}} = 0,5 \cdot r_{1p} \cdot \left(\sqrt{b_{\text{хн}}^2 + 5,33 \cdot h_{\text{хн}}^2} - b_{\text{хн}} \cdot h_{\text{хн}}\right). \quad (6.110)$$

Перетворений індуктивний опір нижньої частини клітини ротора, Ом

$$x''_{\text{нп}} = x'_{\text{нп}} \cdot (1 + \tau_1)^2. \quad (6.111)$$

Перерахуємо індуктивний опір розсіяння двигуна, яке залежить від насичення, Ом

$$x_{\text{пос}} = \frac{x'_{1} \cdot (\lambda_1 - \lambda_{13\text{м}})}{\lambda_1} + \frac{x''_{2} \cdot (\lambda_{20} - \lambda_{23\text{м}})}{\lambda_{20}} + \dots \quad (6.112)$$

$$\dots + x''_{\text{нп}} \cdot \left(\frac{s_{\text{хн}}}{s_{\text{хн}} + s_{\text{ств}}}\right)^2.$$

Активний опір короткого замикання при пуску, Ом

$$r_{\text{кп}} = r'_{1} + r'_{2\text{п}} \cdot m \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1)^2. \quad (6.113)$$

Струм ротора при пуску, А

$$I''_{п2} = \frac{U_1}{\sqrt{r_{кп}^2 + (x_{пос} + 0,25 \cdot x_{зм})^2}} - \dots \quad (6.114)$$

$$\dots - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot (x_{пос} + 0,25 \cdot x_{зм}) \cdot x_{зм}}{N_{п1} \cdot (r_{кп}^2 + (x_{пос} + 0,25 \cdot x_{зм})^2)}.$$

Повний опір схеми заміщення при пуску, Ом

$$z_{кп} = \frac{U_1}{I''_{п2}}. \quad (6.115)$$

Індуктивний опір схеми заміщення при пуску, Ом

$$x_{кп} = \sqrt{z_{кп}^2 - r_{кп}^2}. \quad (6.116)$$

Активна складова струму статора при пуску, А

$$I_{па1} = I_{ca} + I''_{п2} \cdot \left(\frac{r_{кп}}{z_{кп}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_{кп}}{z_{кп}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right), \quad (6.117)$$

Реактивна складова струму статора при пуску, А

$$I_{пр1} = I_{cp} + I''_{п2} \cdot \left(\frac{x_{кп}}{z_{кп}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{r_{кп}}{z_{кп}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \quad (6.118)$$

Фазний струм статора при пуску, А

$$I_{п1} = \sqrt{I_{па1}^2 + I_{пр1}^2}. \quad (6.119)$$

Кратність початкового пускового струму

$$K_{п} = \frac{I_{п1}}{I_1}. \quad (6.120)$$

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

$$r''_{2п} = r'_{2п} \cdot m \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2). \quad (6.121)$$

Кратність пускового моменту

$$\frac{M_{п}}{M_{н}} = m \cdot I''_{п2}^2 \cdot r''_{2п} \cdot \left(\frac{1 - s_{н}}{P_2} \right). \quad (6.122)$$

7 ТЕПЛОВИЙ ТА ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНКИ

При виконанні теплового розрахунку необхідно врахувати, що втрати в обмотках розраховують при опорах, що приведені до максимальної приведеної температури. Для цього опір, визначений при 20°C помножують на коефіцієнт m'_T у відповідності до обраного класу нагрівостійкості ізоляції.

7.1 Тепловий розрахунок асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором

Втрати в обмотці статора при максимальній допущеній температурі, Вт

$$P'_{m1} = m \cdot I_1^2 \cdot m'_T \cdot r'_1. \quad (7.1)$$

де:

- коефіцієнт для класу нагрівостійкості В

$$m'_T = 1 + 0,004 \cdot (120 - 20), \quad (7.2)$$

- коефіцієнт для класу нагрівостійкості F

$$m'_T = 1 + 0,004 \cdot (140 - 20), \quad (7.3)$$

- коефіцієнт для класу нагрівостійкості H

$$m'_T = 1 + 0,004 \cdot (165 - 20). \quad (7.4)$$

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора, мм²

$$S_{п1} = \pi \cdot D_1 \cdot l_1. \quad (7.5)$$

Умовний периметр поперечного перетину трапецеїдального напівзакритого паза, мм

$$\Pi_1 = 2 \cdot h_{п1} + b_1 + b_2. \quad (7.6)$$

Умовний периметр поперечного перетину прямокутного напіввідкритого і відкритого паза, мм

$$\Pi_1 = 2 \cdot (h_{п1} + b_{п1}). \quad (7.7)$$

Умовна поверхня охолодження пазів, мм²

$$S_{ип} = z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1, \quad (7.8)$$

Умовна поверхня охолодження лобової частини обмотки, мм²

$$S_{л1} = 4 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{в1}. \quad (7.9)$$

Умовна поверхня охолодження двигуна без охолоджувальних ребер, мм²

$$S_{маш} = \pi \cdot D_{н1} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{в1}). \quad (7.10)$$

Умовна поверхня охолодження двигуна з охолоджувальними ребрами, мм²

$$S_{\text{машр}} = (\pi \cdot D_{\text{н1}} + 8 \cdot n_p \cdot h_{vr}) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{в1}}). \quad (7.11)$$

dep_p – кількість охолоджуючих ребер на станині,

$$n_p = 1,6 \cdot \sqrt[3]{h}, \quad (7.12)$$

h_{vr} – висота охолоджувального ребра, мм

$$h_{vr} = 0,6 \cdot \sqrt[4]{h^3}. \quad (7.13)$$

Значення n_p та h_{vr} при розрахунку приймаються цілим числом.

Щільність теплового потоку, що генерується сумарними втратами в міді обмотки та активної сталі, розрахована щодо внутрішньої площі охолоджуваної поверхні статора, Вт/мм²

$$p_{\text{п1}} = \frac{k \cdot \left(2 \cdot P'_{\text{м1}} \cdot \frac{l_1}{l_{\text{сп1}}} + P_{\text{с}\Sigma} \right)}{S_{\text{п1}}}, \quad (7.14)$$

де k – коефіцієнт, який характеризує частину втрат у активній частині статора, яка передається по повітрю всередині двигуна, визначається за табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Значення коефіцієнта k

$2 \cdot p$	k	
	Ступінь захисту IP44	Ступінь захисту IP23
2; 4	0,20–0,22	0,80–0,84
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

$$p_{\text{ін1}} = \frac{2 \cdot P'_{\text{м1}} \cdot l_1}{l_{\text{сп1}} \cdot S_{\text{ін1}}}. \quad (7.15)$$

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

$$p_{\text{л1}} = \frac{2 \cdot P'_{\text{м1}} \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}} \cdot S_{\text{л1}}}. \quad (7.16)$$

Окружна швидкість ротора, м/с

$$\vartheta_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n_1}{60000}. \quad (7.17)$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні активної частини статора над температурою повітря всередині машини, °C

$$\Delta t_{п1} = \frac{p_{п1}}{\alpha_1}, \quad (7.18)$$

де α_1 – див. додаток Б.

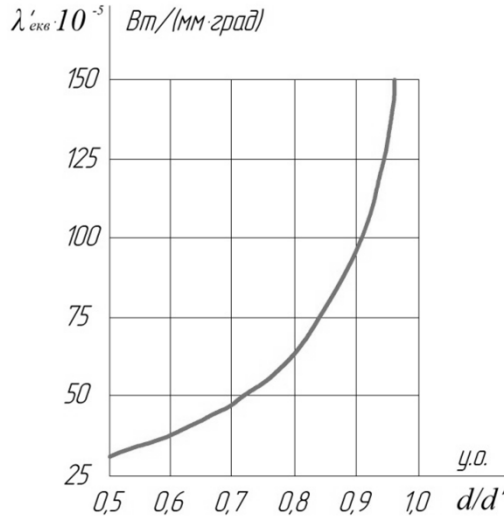


Рисунок 7.1 – Середні значення $\lambda'_{екв}$

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

$$\Delta t_{in1} = p_{in1} \cdot \left(\frac{b_{и1}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right), \quad (7.19)$$

де $b_{и1}$ – одностороння товщина ізоляції в пазу статора, при напіввідкритих і відкритих прямокутних пазах розраховується за (7.20), при трапецеїдальних пазах статора приймається за табл. 2.4.

$\lambda_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції в пазу, що включає повітряні прошарки, $\lambda_{екв} = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·град);

$\lambda'_{\text{екв}}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки, що залежить від відношення діаметра не ізольованого проводу до діаметра ізольованого проводу, див. рис. 7.1.

Одностороння товщина ізоляції в пазу статора при напіввідкритих і відкритих прямокутних пазах

$$b_{и1} = \frac{b_{п1} - N_{ш} \cdot b}{2}. \quad (7.20)$$

Перепад температури в ізоляції пазах жорстких котушок або напівкотушок, °C

$$\Delta t_{и1} = p_{и1} \cdot \frac{b_{и1}}{\lambda'_{\text{екв}}}, \quad (7.21)$$

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

$$\Delta t_{л1} = \frac{p_{л1}}{\alpha_1}, \quad (7.22)$$

де α_1 – див. додаток Б.

Перевищення температури в ізоляції лобових частин котушок з круглих проводів, °C

$$\Delta t_{ил1} = p_{л1} \cdot \left(\frac{b_{ил1}}{\lambda'_{\text{екв}}} + \frac{h_{п1}}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right), \quad (7.23)$$

де $b_{ил1}$ – одностороння товщина ізоляції котушок у лобовій частині, обирається за табл. 7.2.

При відсутності ізоляції котушок у лобових частинах перший доданок у формулі (7.23) дорівнює нулю.

Таблиця 7.2 – Одностороння товщина ізоляції обмотки статора

Форма пазу	Обмотка	h , мм	$b_{ил1}$, мм
Трапецеїдальний напівзакрий	Одношарова всипна	50– 80	0,20
		90– 132	0,25
		160	0,40
	Двошарова всипна	180– 280	0,40
Прямокутний напіввідкритий і відкритий	Двошарова з жорстких котушок	280– 355	0,60

Перевищення температури в ізоляції лобових частин жорстких котушок або напівкотушок, °C

$$\Delta t_{il1} = p_{л1} \cdot \frac{b_{il1}}{\lambda_{екв}}, \quad (7.24)$$

де b_{il1} – одностороння товщина ізоляції котушок у лобовій частині, обирається за табл. 7.2.

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

$$\Delta t'_1 = \frac{2 \cdot l_1 \cdot (\Delta t_{п1} + \Delta t_{ип1})}{l_{cp1}} + \frac{2 \cdot l_{л1} \cdot (\Delta t_{л1} + \Delta t_{il1})}{l_{cp1}}. \quad (7.25)$$

Втрати в обмотці ротора при максимальній допустимій температурі, Вт

$$P'_{м2} = m \cdot I''_2{}^2 \cdot m'_T \cdot r''_2. \quad (7.26)$$

Втрати в двигуні, які передаються повітрю всередині двигуна при ступені захисту IP44, Вт

$$P'_\Sigma = k \cdot \left(\frac{2 \cdot P'_{м1} \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right) + \frac{2 \cdot P'_{м1} \cdot l_{л1}}{l_{cp1}} + \dots \quad (7.27)$$

$$\dots + P'_{м2} + 0,1 \cdot P_{мх\Sigma} + P_d,$$

де k – за табл. 7.1.

Втрати в двигуні, які передаються повітрю всередині двигуна при ступені захисту IP23, Вт

$$P'_\Sigma = k \cdot \left(\frac{2 \cdot P'_{м1} \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right) + \frac{2 \cdot P'_{м1} \cdot l_{л1}}{l_{cp1}} + \dots \quad (7.28)$$

$$\dots + P'_{м2} + P_{мх\Sigma} + P_d,$$

де k – за табл. 7.1.

Середнє перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою навколишнього повітря без охолоджуючих ребер на станині, °C

$$\Delta t_B = \frac{P'_\Sigma}{S_{маш} \cdot \alpha_B}, \quad (7.29)$$

де α_B – коефіцієнт нагрівання повітря, знаходиться за додатком В.

Середнє перевищення температури обмотки над температурою навколишнього повітря, °C

$$\Delta t_1 = \Delta t_B + \Delta t'_1. \quad (7.30)$$

7.2 Вентиляційний розрахунок асинхронного двигуна

7.2.1 Порядок розрахунку для асинхронного двигуна із ступенем захисту IP44, способом охолодження IC0141

Максимально припустимий зовнішній діаметр корпусу, мм

$$D_{\text{корп}} = 2 \cdot (h - h_{\text{л}}), \quad (7.31)$$

де $h_{\text{л}}$ – мінімально припустима відстань від нижньої частини корпусу двигуна до опорної площини лап, визначається за рис. 7.2.

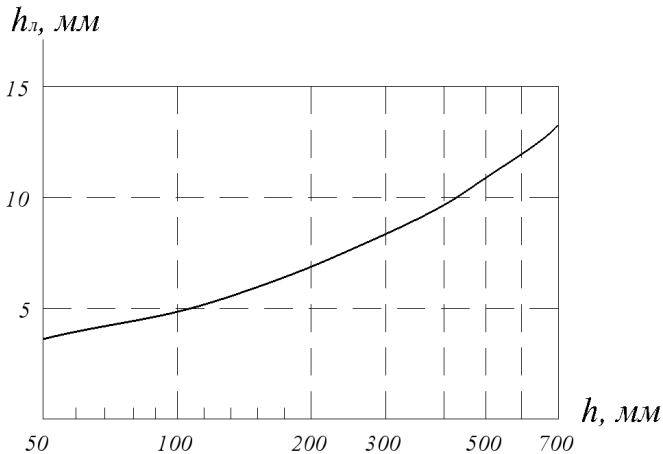


Рисунок 7.2 – Вибір мінімально припустимої відстані від нижньої частини корпусу двигуна до опорної площини лап

Коефіцієнт, який враховує зміну тепловіддачі до довжині корпусу двигуна у залежності від його діаметра і частоти обертання

$$k_2 = 2,2 \cdot \sqrt[4]{\frac{n_1^3}{10^9}} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{корп}}}{100}}. \quad (7.32)$$

Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна, $\text{м}^3/\text{с}$

$$V_{\text{в}} = \frac{k_2 \cdot P'_{\Sigma}}{c_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{в}}}, \quad (7.33)$$

де $c_{\text{в}}$ – теплоємність повітря, $c_{\text{в}} = 1100 \text{ Дж}/^\circ\text{С} \cdot \text{м}^3$.

Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна, м³/с

$$V'_B = 0,6 \cdot \frac{n_1}{10^5} \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100} \right)^3. \quad (7.34)$$

Напір повітря, що розвивається зовнішнім вентилятором, Па

$$H = 12,3 \cdot \frac{n_1^2}{10^6} \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100} \right)^2. \quad (7.35)$$

7.2.2 Порядок розрахунку для асинхронного двигуна із ступенем захисту IP23, способом охолодження IC01

Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна, м³/с

$$V_B = \frac{P'_\Sigma}{c_B \cdot 2 \cdot \Delta t_B}, \quad (7.36)$$

де c_B – теплоємність повітря, $c_B = 1100$ Дж/°С·м³.

Коефіцієнт

$$k_1 = 3,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{n_1^3}{10^9} \cdot \frac{n_k \cdot l_k + 100}{100}}. \quad (7.37)$$

Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна, м³/с

$$V'_B = \frac{k_1}{100} \cdot \left(\frac{D_{H2}}{100} \right)^2. \quad (7.38)$$

Напір повітря, що розвивається при радіальній вентиляції, Па

$$H = 7,85 \cdot \frac{n_1^2}{10^6} \cdot \left(\frac{D_{H2}}{100} \right)^2. \quad (7.39)$$

8 МАСА ДВИГУНА ТА ДИНАМІЧНИЙ МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ РОТОРА

Попередні значення маси складальних одиниць і двигуна в цілому визначають після закінчення проектування двигуна за формулами, які приведені у поточному розділі.

Маса ізолюваних проводів обмотки статора при круглому поперечному перетині провідника, кг

$$m_{м1} = \left(7,55 + 1,35 \cdot \left(\frac{d'}{d} \right)^2 \right) \cdot z_1 \cdot \frac{N_{п1}}{2} \cdot l_{ср1} \cdot c \cdot s \cdot 10^{-6}. \quad (8.1)$$

Маса ізолюваних проводів обмотки статора при прямокутному поперечному перетині провідника, кг

$$m_{м1} = \left(7,55 + 1,35 \cdot \frac{s'}{s} \right) \cdot z_1 \cdot \frac{N_{п1}}{2} \cdot l_{ср1} \cdot c \cdot s \cdot 10^{-6}. \quad (8.2)$$

Маса алюмінію короткозамкненого ротора, кг

$$m_{ал2} = 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot (z_2 \cdot S_{ст} \cdot l_2 + 2 \cdot \pi \cdot D_{клср} \cdot S_{кл} + \dots + 1,1 \cdot N_{л} \cdot (l_{л} - l_{кл}) \cdot h_{л} \cdot b_{л}), \quad (8.3)$$

де $N_{л}$ – кількість вентиляційних лопаток, визначається у відповідності до типорозміру двигуна за табл. 8.1.

Таблиця 8.1 – Кількість вентиляційних лопаток

h , мм	50– 100	112– 250	280– 355
$N_{л}$	6– 9	10– 14	17– 22

Маса сталі осердя статора і ротора, кг

$$m_{с\sigma} = 7,8 \cdot l_1 \cdot k_c \cdot \left(0,785 \cdot (D_{н1}^2 - D_2^2) - z_1 \cdot s_{п1} - \dots - z_2 \cdot s_{п2} - \frac{\pi \cdot n_{к2} \cdot d_{к2}^2}{4} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (8.4)$$

Маса ізоляції статора при трапецеїдальних напівзакритих пазах, кг

$$m_{i1} = 1,35 \cdot (l_1 + 20) \cdot (2 \cdot h_{п1} + 3 \cdot b_{п}) \cdot b_{и1} \cdot z_1 \cdot 10^{-6}, \quad (8.5)$$

де $b_{п}$ – середня ширина паза.

Маса ізоляції статора при прямокутних напіввідкритих і відкритих пазах, кг

$$m_{i1} = 1,35 \cdot ((l_1 + 20) \cdot (2 \cdot b_{и1} \cdot h_{п1} + 2 \cdot b_{п1} \cdot h_{и1}) + \dots \dots + l_{л1} \cdot (2 \cdot b_{и\lambda 1} \cdot h_{п1} + b_{п1} \cdot h_{и\lambda 1})) \cdot z_1 \cdot 10^{-6}, \quad (8.6)$$

Маса конструкційних матеріалів визначається у залежності від ступеня захисту і матеріалу, з якого виконані станина і підшипникові щити за формулами (8.7)– (8.10) із рекомендаціями табл. 8.2.

Маса конструкційних матеріалів, кг

$$m_k = ((0,21 \dots 0,28) \cdot D_{н1}^2 \cdot l_1 + (2,2 \dots 3) \cdot D_{н1}^3) \cdot 10^{-6}, \quad (8.7)$$

$$m_k = ((0,55 \dots 0,75) \cdot D_{н1}^2 \cdot l_1 + (2,3 \dots 3,1) \cdot D_{н1}^3) \cdot 10^{-6}, \quad (8.8)$$

$$m_k = ((0,9 \dots 1,2) \cdot D_{н1}^2 \cdot l_1 + (1,8 \dots 2,5) \cdot D_{н1}^3) \cdot 10^{-6}, \quad (8.9)$$

$$m_k = ((0,9 \dots 1,2) \cdot D_{н1}^2 \cdot l_1 + (10 \dots 15) \cdot D_{н1}^{1,6}) \cdot 10^{-3}. \quad (8.10)$$

Таблиця 8.2 – До визначення маси конструкційних матеріалів асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором

Ступінь захисту	h , мм	Виконання станини і підшипникових щитів	Формула
IP44	$h \leq 200$	Станина і щити з алюмінієвого сплаву	(8.7)
	$h \leq 400$	Станина і підшипникові щити з чавуну	(8.8)
IP23	$h \leq 250$		(8.9)
	$h \leq 355$	Збирання зварюванням	(8.10)

Повна маса двигуна, кг

$$m_{дв} = m_{м1} + m_{ал2} + m_{с\Sigma} + m_{i1} + m_k. \quad (8.11)$$

Наближене значення динамічного моменту інерції короткозамкненого ротора, кг·м²

$$J_{ид} = (0,55 \dots 0,65) \cdot D_{н2}^4 \cdot l_2 \cdot 10^{-12}. \quad (8.12)$$

9 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Завершальним етапом проектування асинхронного двигуна серії 4А є систематизація отриманих результатів та підготовка до захисту курсового проекту. Цей розділ містить перелік контрольних питань, що охоплюють усі ключові стадії розрахунку: від вибору головних розмірів до визначення маси та моменту інерції машини.

Метою наведених питань є перевірка глибини розуміння студентом фізичних процесів в електричній машині, обґрунтованості вибору електромагнітних навантажень та конструктивних параметрів зубцевих зон статора і ротора. Підготовка відповідей дозволить студенту краще зорієнтуватися у взаємозв'язках між геометричними розмірами двигуна та його номінальними, робочими й пусковими характеристиками, що є критично важливим для успішного захисту результатів проектування асинхронних двигунів із висотою вісі обертання до 355 мм.

Для самостійної перевірки готовності до захисту та систематизації розрахункових даних рекомендується опрацювати наступні групи питань, використовуючи при підготовці теоретичний матеріал даного посібника та додаткову профільну літературу [1, 3]:

- 1) Який принцип дії трифазного асинхронного двигуна?
- 2) У чому полягають головні конструктивні та експлуатаційні відмінності двигуна із короткозамкненим ротором від двигуна із фазним ротором?
- 3) Що таке ковзання і в яких межах воно змінюється в руховому режимі?
- 4) Яке призначення шихтованого осердя статора та ротора?
- 5) Які марки електротехнічної сталі використовуються при проектуванні і чим вони відрізняються?
- 6) Дайте характеристику способам виконання двигуна IP44 і IP23.
- 7) Яке призначення повітряного зазору в АД?

- 8) Як впливає величина повітряного зазору на коефіцієнт потужності?
- 9) Чому листи сталі в осердді ізолюють лаком або оксидною плівкою?
- 10) Які параметри називають головними розмірами АД?
- 11) Що таке висота вісі обертання і як вона пов'язана із зовнішнім діаметром статора?
- 12) Як визначається розрахункова потужність?
- 13) Від чого залежить вибір магнітної індукції у повітряному зазорі?
- 14) Що таке коефіцієнт полюсного перекриття?
- 15) Як кількість пар полюсів впливає на габарити двигуна?
- 16) Яка роль обмоткового коефіцієнта на початковому етапі проектування?
- 17) Назвіть причини укорочення кроку обмотки?
- 18) Що таке коефіцієнт заповнення паза і які обмеження на нього накладаються?
- 19) Поясніть застосування проводу прямокутного поперечного перетину переважно для машин великої потужності.
- 20) Що таке активна та реактивна складові струму статора?
- 21) Яке призначення скошу пазів ротора?
- 22) Поясніть призначення короткозамикальних кілець.
- 23) Як впливає форма паза ротора на пускові характеристики?
- 24) Яке призначення вентиляційних лопаток на кільцях ротора?
- 25) Як визначити індукцію в зубцях ротора?
- 26) Як впливає висота спинки ротора на магнітний стан машини?
- 27) Як впливає матеріал стрижнів на характеристики електричної машини?
- 28) Чому в роторі зазвичай не використовують ізоляцію стрижнів?
- 29) З яких ділянок складається магнітний ланцюг АД?
- 30) Чому МРС зубців розраховується за перетином на $1/3$ висоти?

- 31) Що показує коефіцієнт насичення магнітного ланцюга?
- 32) Як впливає насичення сталі на індуктивні опори?
- 33) Які причини виникнення магнітної напруги в ярмі статора?
- 34) Як враховується вплив радіальних каналів на МРС зазору?
- 35) Чим зумовлений вибір між трапецеїдалною та прямокутною формою паза статора для різних висот вісі обертання, і як обрана форма паза впливає на розрахунок коефіцієнта провідності пазового розсіювання?
- 36) Що таке режим неробочого ходу АД?
- 37) З чого складаються втрати неробочого ходу?
- 38) Що таке номінальний режим роботи АД?
- 39) Як визначаються втрати в міді статора та ротора?
- 40) Що таке додаткові втрати Р_д і як вони нормуються?
- 41) Як розраховується ККД двигуна?
- 42) Що таке кругова діаграма АД?
- 43) Як визначити номінальний момент двигуна?
- 44) Яка залежність між максимальним моментом і критичним ковзанням?
- 45) Як розраховується кратність максимального моменту?
- 46) Що таке початковий пусковий струм і кратність пускового струму?
- 47) Як розраховується пусковий момент і кратність пускового моменту?
- 48) Що таке ефект витіснення струму і як він впливає на пуск АД?
- 49) Як змінюється опір ротора під час пуску?
- 50) Як впливає насичення від потоків розсіювання на пуск?
- 51) Чому пусковий момент АД з короткозамкненим ротором відносно невеликий?
- 52) Опишіть способи зниження пускових струмів.
- 53) Які вимоги ДСТУ до кратності пускового моменту?
- 54) Яка мета теплового розрахунку?
- 55) Чому виникає неприпустиме перегрів статора та які основні причини виходу підшипникових вузлів з ладу?

ЛІТЕРАТУРА

1. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини : навч. посіб. для електротехн. спец. ВНЗів. Запоріжжя. ЗНТУ, 2005. 660 с.
2. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. Design of Rotating Electrical Machines : John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 612 p.
3. Ципленков Д.В., Іванов О.Б., Бобров О.В., Кузнецов В.В., Артемчук В. В., Баб'як М.О. Проектування електричних машин : навч. посіб. Нац. техн. ун–т «Дніпровська політехніка». Д. : НТУ «ДП», 2020. 408 с.
4. Мілих В.І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутою обмоткою ротора [Текст]: навч. посіб. [для студ. електротехнічних спеціальностей]. Харків: НТУ «ХП», 2009. 99 с.
5. Lipo T. A. Introduction to AC Machine Design. Piscataway : IEEE Press, Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2017. 512 p.
6. Розводюк М. П., Левицький С. М., Бомбик В. С. Розрахунок і конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором. Курсове проектування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2018. 135 с.
7. Попова Т.В., Левенков І.В., Дівчук Т.Є. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Електричні машини» для студентів спеціальностей 6.050701 і 6.050702 усіх форм навчання. Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. 66 с.
8. ДСТУ EN 60034-12 Машини електричні обертові. Частина 12 Пускові характеристики одношвидкісних трифазних асинхронних двигунів
9. ДСТУ EN 60072-1 : 2022 Машини електричні обертові. Розміри та вихідна серія. Частина 1. Номери корпусів від 56 до 400 і номери фланців від 55 до 1080.
10. IEC 60317-34:1997. Specifications for particular types of winding wires. Part 34: Polyester enamelled round copper wire, class 130 L. 2nd ed. Geneva : IEC, 1997. 15 p.
11. Мідні емальовані дроти в стандартах України та СНД: довідник. Coretech, LTD. Київ, 2015. 10 с. URL:

<https://coretech.com.ua/docs/coretech-copper-wire-UA-CIS-2015.pdf>
(дата звернення: 19.06.2026).

12. ДСТУ EN 60317-13:2022 Технічні умови для окремих типів обмотувальних дротів. Частина 13. Дріт мідний круглий з поліестеру або поліестеріміду, покритого поліамідімідом, клас 200.

13. ДСТУ EN 60317-0-4:2022 Технічні умови для окремих типів обмотувальних дротів. Частина 0-4. Загальні вимоги. Дріт мідний прямокутний, обмотаний скловолокном, просочений смолою або лаком, голий або емальований.

14. ДСТУ EN 60317-17:2022 Технічні умови на окремі типи обмотувальних проводів. Частина 17. Провід мідний прямокутний, емальований полівінілацетатом, клас 105. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 21 с.

15. ДСТУ EN 60317-29:2022 Технічні умови на окремі типи обмотувальних проводів. Частина 29. Провід мідний прямокутний з емалевою ізоляцією на основі поліефіру або поліефіріміду та з покриттям поліамідімідом, клас 200. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 15 с.

16. ДСТУ EN 60034-1:2016 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. II, 106 с.

17. ДСТУ ІЕС 60085:2015 Ізоляція електрична. Оцінювання нагрівостійкості та літерні позначки (ІЕС 60085:2007, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. II, 16 с.

18. ДСТУ EN 60529:2018. Ступені захисту, забезпечувані кожухами (Код IP). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 41 с.

19. ДСТУ EN 60034-6:2015. Машини електричні обертові. Частина 6. Методи охолодження (ІС-код) (EN 60034-6:1993, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 18 с.

20. ДСТУ EN 60034-12:2019. Машини електричні обертові. Частина 12. Пускові характеристики одношвидкісних трифазних асинхронних двигунів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 22 с.

Додаток А

Таблиця А.1– Розміри провідників круглого поперечного перетину марки ПЕТВ, ПЕТ–155

d , мм	S''_{nl} , мм ²	d' , мм	d , мм	S''_{nl} , мм ²	d' , мм
1	2	3	4	5	6
0.063	0.00312	0.085	0.67	0.3530	0.730
0.071	0.00396	0.095	0.69	0.3740	0.750
0.080	0.00503	0.105	0.72	0.4070	0.780
0.090	0.00636	0.117	0.74	0.4300	0.805
0.10	0.00785	0.129	0.77	0.4660	0.835
0.11	0.00950	0.132	0.80	0.5030	0.865
0.12	0.01131	0.142	0.83	0.5410	0.895
0.13	0.01327	0.152	0.86	0.5810	0.925
0.14	0.01539	0.162	0.90	0.6360	0.965
0.15	0.01767	0.180	0.93	0.6790	0.995
0.16	0.02011	0.190	0.96	0.7240	1.025
0.17	0.0227	0.200	1.00	0.785	1.080
0.18	0.0255	0.210	1.04	0.849	1.120
0.19	0.0284	0.220	1.08	0.916	1.160
0.20	0.0314	0.230	1.12	0.985	1.200
0.21	0.0346	0.240	1.16	1.057	1.240
0.23	0.0415	0.265	1.20	1.131	1.280
0.25	0.0491	0.285	1.25	1.227	1.330
0.27	0.0573	0.305	1.30	1.327	1.385
0.29	0.0661	0.325	1.35	1.431	1.435
0.31	0.0755	0.345	1.40	1.539	1.485
0.33	0.0855	0.365	1.45	1.651	1.535
0.35	0.0962	0.390	1.50	1.767	1.585
0.38	0.1134	0.420	1.56	1.911	1.645
0.41	0.1320	0.450	1.62	2.060	1.705
0.44	0.1521	0.480	1.68	2.220	1.765
0.47	0.1735	0.510	1.74	2.380	1.825
0.49	0.1886	0.530	1.81	2.570	1.905
0.51	0.2040	0.565	1.88	2.780	1.975
0.53	0.2210	0.585	1.95	2.990	2.045
0.55	0.2380	0.605	2.02	3.200	2.115
0.57	0.2550	0.625	2.10	3.460	2.200
0.59	0.2730	0.645	2.26	4.010	2.360
0.62	0.3020	0.675	2.44	4.680	2.540
0.64	0.3220	0.700	2.63	5.430	–

Таблиця А.2. – Розміри провідників круглого поперечного перетину марки ПЕТ–200

d , мм	S''_{nl} , мм ²	d' , мм	d , мм	S''_{nl} , мм ²	d' , мм
0.5	0.196	0.552	1.25	1.227	1.325
0.56	0.246	0.612	1.32	1.368	1.395
0.63	0.312	0.690	1.40	1.539	1.485
0.71	0.396	0.770	1.50	1.767	1.585
0.75	0.442	0.810	1.60	2.011	1.685
0.80	0.503	0.865	1.70	2.270	1.785
0.85	0.567	0.915	1.80	2.545	1.895
0.90	0.636	0.965	1.90	2.835	1.995
0.95	0.709	1.015	2.00	3.142	2.095
1.00	0.785	1.080	2.12	3.530	2.215
1.06	0.882	1.135	2.24	3.941	2.345
1.12	0.985	1.195	2.36	4.374	2.465
1.18	1.094	1.255	2.50	4.909	2.605

Таблиця А.3 – Розміри провідників прямокутного поперечного перетину

[illegible]

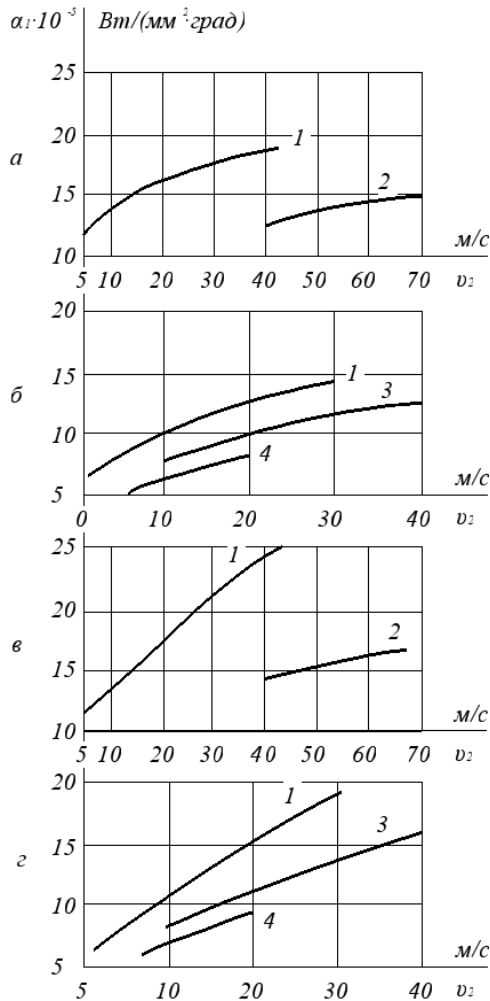
Продовження таблиці А.3

b, мм	S, мм², по меншому розміру a, мм									
	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36
2,00	2,585	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	2,753	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—	—	—
2,36	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—	—	—
2,50	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—	—	—
2,65	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—	—	—
2,80	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—	—	—
3,00	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—	—	—
3,15	4,195	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315	6,693	—
3,35	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—	7,141	—
3,55	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163	7,589	7,829
3,75	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—	8,037	—
4,00	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	8,897	8,891
4,25	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—	9,157	—
4,50	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	9,717	10,07
4,75	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—	10,28	—
5,00	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	10,84	11,25
5,30	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—	11,51	—
5,60	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	12,18	12,67
6,00	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—	13,08	—
6,30	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,75	14,32
6,70	9,165	—	10,51	—	11,7	—	13,04	—	14,65	—
7,10	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,21
7,50	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—	16,44	—
8	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6	17,56	18,33
8,5	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—	18,68	—
9	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,8	20,69
9,5	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—	20,92	—
10,0	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,05
10,6	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—	23,38	—
11,2	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38	24,73	25,88
11,8	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—	26,07	—
12,5	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14	27,64	28,95

Продовження таблиці А.3

b, мм	S, мм², по меншому розміру a, мм							
	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75
3,55	8,326	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,826	—	—	—	—	—	—	—
4,00	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—
4,25	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—
4,50	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—
4,75	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—
5,00	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2	17,2	—
5,30	12,7	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—
5,60	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14
6,00	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—
6,30	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56	21,82	22,77
6,70	16,2	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—
7,10	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77
7,50	18,2	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—
8	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14
8,5	20,7	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—
9	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6	31,4	32,89
9,5	23,2	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—
10,0	25,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64
10,6	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—
11,2	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14
11,8	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,24	—
12,5	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02
b, мм	S, мм², по меншому розміру a, мм							
	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	
5,60	21,54							
6,00	23,14							
6,30	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—	
6,70	25,94	—	29,29	—	—	—	—	
7,10	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—	
7,50	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—	
8	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94	
8,5	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74	
9	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54	
9,5	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34	
10,0	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14	
10,6	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,5	
11,2	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86	
11,8	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22	
12,5	49,14	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14		

Додаток Б

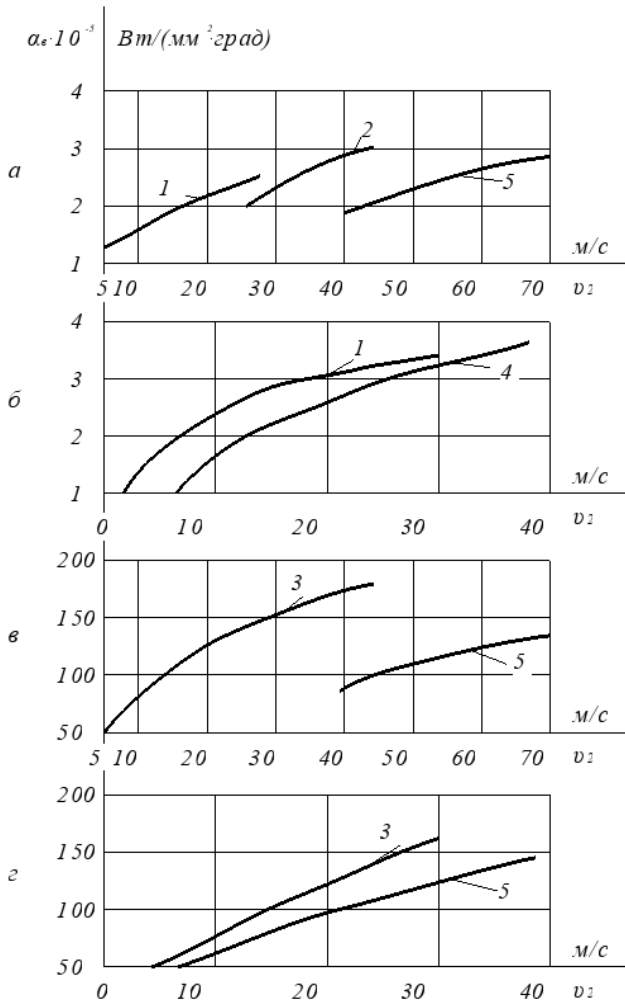


1 – $D_{H1} = 80-500 \text{ мм}$; 2 – $D_{H1} > 500 \text{ мм}$; 3 – $D_{H1} > 500 \text{ мм}$, $2p=4, 6, 8$;
4 – $D_{H1} > 500 \text{ мм}$, $2p = 10, 12$

а – ступінь захисту IP44, спосіб охолодження IC0141, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=2$;
б – IP44, IC0141, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=4, 6, 8, 10, 12$; в – IP23, IC01, $U \leq 660 \text{ В}$,
 $2p=2$; г – IP23, IC01, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=4, 6, 8, 10, 12$;

Рисунок Б.1 – Середні значення коефіцієнта α_1

Додаток В



1 – $D_{H1} = 80\text{--}300 \text{ мм}$; 2 – $D_{H1} > 300\text{--}500 \text{ мм}$; 3 – $D_{H1} = 80\text{--}500 \text{ мм}$;
 4 – $D_{H1} > 300\text{--}700 \text{ мм}$; 5 – $D_{H1} > 500\text{--}700 \text{ мм}$
 а – IP44, IC0141, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=2$; б – IP44, IC0141, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=4\text{...}12$;
 в – IP23, IC01, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=2$; г – IP23, IC0151, $U \leq 660 \text{ В}$, $2p=4\text{...}12$

Рисунок В.1 – Середні значення коефіцієнта α_b

Додаток Г

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ТИПУ 4А90L6УЗ

Розрахунок асинхронного двигуна виконано у програмному засобі Mathcad.

Вихідні дані для проектування:

Тип двигуна – 4А90L6УЗ. Вихідні дані для проектування:

- корисна механічна потужність на валу $P_2 := 1500$ Вт;
- синхронна частота обертання $n_1 := 1000$ об/хв.;
- номінальна напруга $U_1 := 220$ В;
- коефіцієнт корисної дії $\eta := 0.75$;
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi := 0.7$;
- кількість фаз $m := 3$;
- частота $f := 50$ Гц.

Електромагнітний розрахунок

Кількість пар полюсів за (1.1)

$$p := \frac{60 \cdot f}{n_1} = 3 \text{ .}$$

Діаметр осердя статора за табл. 1.1

$$D_{H1} := D_{H1\max} = 149 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр осердя статора за табл. 1.2

$$D_1 := 0.67 \cdot D_{H1} = 99.83 \text{ мм.}$$

Приймаємо $D_1 := 100$ мм.

Коефіцієнт за рис. 1.2 $k_H := 0.945$.

Розрахункова потужність за (1.2)

$$P' := \frac{k_H \cdot P_2}{\eta \cdot \cos \varphi} = 2.7 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Обмотка статора – виспна одношарова із мідного проводу круглого поперечного перетину, паз статора – трапецеїдальний напівзакритий, ізоляція класу нагрівостійкості – В [17].

Корегуючий коефіцієнт за табл.1.3 із урахуванням класу нагрівостійкості ізоляції $k_1 := 0.86$.

Електромагнітні навантаження за рис. 1.3

$$A'_1 := 225 \cdot k_1 = 193.5 \text{ А/см.}$$

Корегуючий коефіцієнт за табл.1.3 $k_2 := 1$.

Магнітна індукція у повітряному зазорі за рис. 1.4

$$B'_\delta := 0.852 \cdot k_2 = 0.852 \text{ Тл.}$$

Обмотковий коефіцієнт приймаємо $k'_{об} := 0.94$.

Розрахункова довжина магнітопроводу за (1.3)

$$l'_1 := \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A'_1 \cdot B'_\delta \cdot k'_{об}} = 150.184 \text{ мм.}$$

Приймаємо $l'_1 := 140 \text{ мм.}$

При відсутності радіальних вентиляційних каналів

$$l_1 := l'_1 = 140 \text{ мм.}$$

Довжина осердя ротора

$$l_2 := l_1 = 140 \text{ мм.}$$

Необхідно оцінити правильність розрахунків. За (1.5)

$$\lambda := \frac{l_1}{D_1} = 1.4$$

Коефіцієнт за табл. 1.6 $k_{nk} := 1.05$.

За табл. 1.5

$$\lambda_{\max} := (1.46 - 0.00071 \cdot D_{H1}) \cdot k_{nk} = 1.422$$

Перевірка показала $\lambda_{\max} > \lambda$.

Повітряний зазор за табл. 1.8 $\delta := 0.25 \text{ мм.}$

Зовнішній діаметр осердя ротора за (1.6)

$$D_{H2} := D_1 - 2 \cdot \delta = 99.5 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр ротора за (1.8)

$$D_2 := 0.23 \cdot D_{H1} = 34 \text{ мм.}$$

Розрахунок зубцевої зони і обмотки статора

Конструкція статора є шихтованою і складається з ізольованих штампованих листів електротехнічної сталі марки 2013 товщиною 0,5 мм, коефіцієнт заповнення сталі $k_c := 0.97$.

Кількість пазів на полюс і фазу за табл. 2.2 $q_1 := 2$.

Кількість пазів осердя статора за (2.1)

$$z_1 := 2 \cdot p \cdot m \cdot q_1 = 36 \text{ .}$$

Двошарова обмотка має скорочений крок $\beta_1 := 0.7$.

Крок секції за (2.2)

$$y_{п1} := \frac{z_1 \cdot \beta_1}{2 \cdot p} = 6 \text{ .}$$

Коефіцієнт розподілу за (2.3)

$$k_p := \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q_1}\right)} = 0.966 \text{ .}$$

Коефіцієнт укорочення за (2.4)

$$k_y := \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta_1\right) = 1 \text{ .}$$

Обмотковий коефіцієнт за (2.5)

$$k_{об1} := k_p \cdot k_y = 0.966 \text{ .}$$

Попереднє значення магнітного потоку за (2.6)

$$\Phi' := B'_\delta \cdot D_1 \cdot \frac{l_1}{p} \cdot 10^{-6} = 3.976 \times 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Кількість витків в обмотці фази за (2.7)

$$w'_1 := \frac{k_H \cdot U_1}{222 \cdot k_{об1} \cdot \Phi'} = 243.844 \text{ .}$$

Кількість паралельних гілок $a_1 := 1$

Кількість ефективних провідників за (2.8)

$$N'_{п1} := \frac{w'_1 \cdot a_1}{p \cdot q_1} = 40.641 \text{ .}$$

Приймаємо $N'_{п1} := 41$.

Уточнюємо кількість витків в обмотці фази за (2.9)

$$w_1 := \frac{N'_{п1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = 246 .$$

Магнітний потік за (2.10)

$$\Phi := \frac{\Phi' \cdot w'_1}{w_1} = 3.9411 \times 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Індукція у повітряному зазорі за (2.11)

$$B_{\delta} := \frac{B'_{\delta} \cdot w'_1}{w_1} = 0.845 \text{ Тл.}$$

Відхилення від попередньо визначеного значення індукції у повітряному зазорі за (2.12)

$$\frac{B_{\delta} - B'_{\delta}}{B'_{\delta}} \cdot 100 = -0.877 \text{ \%}.$$

Відхилення за (2.12) знаходиться у межах припустимих значень.

Номінальний фазний струм за (2.13)

$$I_1 := \frac{P_2}{3 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = 4.329 \text{ А.}$$

Лінійне навантаження статора за (2.14)

$$A_1 := \frac{10 \cdot N'_{п1} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = 203.388 \text{ А/см.}$$

Відхилення від попередньо визначеного значення лінійного навантаження статора за (2.15)

$$\frac{A_1 - A'_1}{A'_1} \cdot 100 = 5.11 \text{ \%}$$

Відхилення за (2.15) знаходиться у межах припустимих значень.

Зубцевий поділ по внутрішньому діаметру статора за (2.16)

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = 8.727 \text{ мм.}$$

За табл. 2.3 обираємо значення індукції:

- у спинці статора $B_{c1} := 1.4 \text{ Тл}$;
- у зубцевій зоні статора $B_{z1} := 1.727 \text{ Тл}$.

Ширина зубця за (2.17)

$$b_{31} := \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{31}} = 4.4 \text{ мм.}$$

Висота спинки статора за (2.18)

$$h_{c1} := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{c1}} = 10.4 \text{ мм.}$$

Висота паза за (2.19)

$$h_{п1} := \frac{D_{н1} - D_1}{2} - h_{c1} = 14.1 \text{ мм.}$$

Ширина шліца паза а (2.20)

$$b'_{ш1} := 0.3 \cdot \sqrt{h} = 2.8 \text{ мм.}$$

Більша ширина паза за (2.21)

$$b_1 := \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{п1})}{z_1} - b_{31} = 6.8 \text{ мм.}$$

Менша ширина паза за (2.22)

$$b_2 := \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{ш1} - b'_{ш1}) - z_1 \cdot b_{31}}{z_1 - \pi} = 4.6 \text{ мм.}$$

Перевіримо правильність визначення розмірів зубцевої зони статора

$$z_1 \cdot (b_1 - b_2) + \pi \cdot (b_2 - b'_{ш1}) - 2 \cdot \pi \cdot (h_{п1} - h_{ш1}) = -0.741 \text{ мм.}$$

Площа поперечного перетину пазу в штампі за (2.24)

$$s'_{п1} := \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left(h_{п1} - h_{ш1} - \frac{b_2 - b'_{ш1}}{2} \right) = 72.521 \text{ мм}^2.$$

За табл. 2.4 визначаємо: $b_c := 0.1$, $h_c := 0.1$, $b_{н1} := 0.25$.

Площа поперечного перетину паза в світі за (2.25)

$$s_{п1} := \left(\frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left(h_{п1} - h_{ш1} - \frac{b_2 - b'_{ш1}}{2} - h_c \right) = 70.689 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перетину корпусної ізоляції за (2.26)

$$s_{и} := b_{н1} \cdot (2 \cdot h_{п1} + b_1 + b_2) = 9.9 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перетину прокладок між верхньою та нижньою котушками у пазу та під клином за (2.27)

$$s_{пр} := 0.5 \cdot b_1 + 0.75 \cdot b_2 = 6.85 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перетину пазу, яку займає обмотка за (2.28)

$$S''_{п1} := s_{п1} - s_{и} - s_{пр} = 53.939 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт заповнення пазу $k_{п} := 0.75$.

Необхідний діаметр ізолюваного проводу для $c := 1$ паралельних проводів за (2.30)

$$d'' := \sqrt{\frac{k_{п} \cdot S''_{п1}}{N'_{п1} \cdot c}} = 0.993 \text{ мм}.$$

За Додатком А обираємо провід круглий із параметрами:

- діаметр неізолюваного проводу $d := 0.93\text{мм}$;
- діаметр ізолюваного проводу $d' := 0.995 \text{ мм}$;
- площа поперечного перетину проводу $S := 0.679\text{мм}^2$.

Коефіцієнт заповнення пазу за (2.31)

$$k_{п} := \frac{N'_{п1} \cdot c \cdot d'^2}{S''_{п1}} = 0.753.$$

Уточнюємо значення ширини шліца за (2.32)

$$b''_{ш1} := d' + 2 \cdot b_{и1} + 0.4 = 1.895 \text{ мм}.$$

Із визначених значень за (2.32) і (2.20) приймаємо

$$b_{ш1} := b'_{ш1} = 2.8 \text{ мм}.$$

Густина струму в обмотці статора за (2.33)

$$J_1 := \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = 6.376 \text{ А/мм}^2.$$

Правильність розрахунку перевіряємо за добутком лінійного навантаження на густину струму

$$A_1 \cdot J_1 = 1.297 \times 10^3 \text{ А}^2/\text{мм}^2 \cdot \text{см}.$$

За рис. 2.2 $A'_1 \cdot J'_1 := 2000\text{А}^2/\text{мм}^2 \cdot \text{см}$. Значення з рис. 2.2 при класі ізоляції В необхідно помножити на 0,75і на коефіцієнт за табл. 2.5 $k_{пр} := 1.0$. Порівняємо розраховане значення із рекомендованим

$$\frac{A_1 \cdot J_1 - A'_1 J'_1 \cdot 0.75 \cdot k_{пр}}{A'_1 J'_1 \cdot 0.75 \cdot k_{пр}} \cdot 100 = -13.553 \text{ \%}.$$

Розраховане значення збігається із точністю у 15%.

Середній зубцевий поділ статора за (2.34)

$$t_{cp1} := \pi \cdot \frac{(D_1 + h_{п1})}{z_1} = 9.96 \text{ мм.}$$

Середня ширина катушки обмотки статора за (2.35)

$$b_{cp1} := t_{cp1} \cdot y_{п1} = 59.7 \text{ мм.}$$

Середня довжина однієї лобової частини катушки за (2.36)

$$l_{л1} := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 15 = 109.393 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка обмотки за (2.37)

$$l_{cp1} := 2 \cdot (l_{л1} + l_l) = 498.787 \text{ мм.}$$

Довжина вильота лобової частини обмотки за (2.38)

$$l_{в1} := (0.19 + 0.1 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 10 = 39.274 \text{ мм.}$$

Розрахунок зубцевої зони і обмотки ротора

Для висоти вісі обертання 90 мм паз ротору – овальний напівзакритий, ротор короткозамкнений, матеріал – алюміній. Гранично припустиме значення індукції у зубцевій зоні ротора за табл. 3.1 $B_{з2} := 1.77$ Тл. Кількість пазів ротора за табл. 3.3 $z_2 := 28$. Висота пазу ротора за рис. 3.1 $h_{п2} := 16.5$ мм. Скос пазів виконуємо на одну полюсну поділку.

Розрахункова висота спинки ротора за (3.2)

$$h_{c2} := \frac{D_{н2} - D_2}{2} - h_{п2} - \frac{2}{3} \cdot d_{k2} = 16.25 \text{ мм.}$$

Магнітна індукція в спинці ротора за (3.3)

$$B_{c2} := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot h_{c2}} = 0.893 \text{ Тл.}$$

Визначене за (3.3) значення магнітної індукції у спинці ротора не перевищує максимально припустиме за табл. 3.4.

Зубцевий поділ по зовнішньому діаметру ротора за (3.4)

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_{н2}}{z_2} = 11.2 \text{ мм.}$$

Для напівзакритого пазу відповідно до рис. 3.2, а:

- $h_{шр} := 0.5$ мм;
- $h_{2p} := 0.0$ мм;

- $b_{\text{шп}} := 1.0 \text{ мм.}$

Ширина зубця за (3.5)

$$b_{32} := \frac{t_2 \cdot B_{\delta}}{B_{32} \cdot k_c} = 5.5 \text{ мм.}$$

Менший радіус пазу за (3.6)

$$r_{2p} := \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2 \cdot h_{H2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 - \pi)} = 1.1 \text{ мм.}$$

Більший радіус пазу за (3.7)

$$r_{1p} := \frac{\pi \cdot (D_{H2} - h_{\text{шп}} - 2 \cdot h_{2p}) - z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (z_2 + \pi)} = 2.5 \text{ мм.}$$

Відстань між центрами радіусів за (3.8)

$$h_{1p} := h_{H2} - h_{\text{шп}} - h_{2p} - r_{1p} - r_{2p} = 12.4 \text{ мм.}$$

За (3.9) перевіримо правильність визначення діаметрів паза

$$\pi \cdot h_{1p} - z_2 \cdot (r_{1p} - r_{2p}) = -0.244 \text{ мм} \approx 0.$$

Площа поперечного перетину паза в штампі за (3.10)

$$S_{\text{ст}} := 0.5 \cdot (r_{1p}^2 + r_{2p}^2) \cdot \pi + (r_{1p} + r_{2p}) \cdot h_{1p} = 56.358 \text{ мм}^2.$$

Розрахунок короткозамкнутого кільця

Довжина лобової частини стрижня $l_{L2} := 50 \text{ мм}$, коефіцієнт вигину стрижня $k_L := 0.9$.

Поперечний перетин короткозамкнутого кільця за (3.20)

$$S_{\text{кл}} := \frac{(0.4 \cdot z_2 \cdot S_{\text{ст}})}{2 \cdot p} = 105.202 \text{ мм}^2.$$

Висота кільця за (3.22)

$$h_{\text{кл}} := 1.2 \cdot h_{H2} = 19.8 \text{ мм.}$$

Довжина кільця за (3.24)

$$l_{\text{кл}} := \frac{S_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} = 5.313 \text{ мм.}$$

Середній діаметр кільця за (3.25)

$$D_{\text{клср}} := D_{H2} - h_{\text{кл}} = 79.7 \text{ мм.}$$

Вильот лобової частини обмотки за (3.27)

$$l_{B2} := k_L \cdot l_{L2} + l_{KL} = 50.313 \text{ мм.}$$

Розрахунок магнітного ланцюга

Коефіцієнт, який враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчастої будови статора за (4.1)

$$k_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{ш1}}{t_1 - b_{ш1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{ш1}}} = 1.293 \text{ .}$$

Коефіцієнт, який враховує збільшення магнітного опору повітряного зазору внаслідок зубчастої будови ротора за (4.2)

$$k_{\delta 2} := 1 + \frac{b_{шр}}{t_2 - b_{шр} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{шр}}} = 1.041 \text{ .}$$

Коефіцієнт, який враховує зменшення магнітного опору повітряного зазору при відсутності радіальних каналів на статорі або на роторі $k_k := 1$.

Загальний коефіцієнт повітряного зазору за (4.5)

$$k_{\delta} := k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_k = 1.347 \text{ .}$$

МРС повітряного зазору за (4.6)

$$F_{\delta} := 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 227.451 \text{ А.}$$

МРС зубцевої зони статора

Для значення магнітної індукції $B_{31} = 1.727 \text{ Тл}$ за табл. 4.1 обираємо значення напруженості магнітного поля $H_{31} := 12.4 \text{ А/см.}$

Середня довжина шляху магнітного потоку за (4.9)

$$L_{31} := h_{п1} = 14.1 \text{ мм.}$$

МРС зубців статора за (4.10)

$$F_{31} := 0.1 \cdot H_{31} \cdot L_{31} = 17.484 \text{ А.}$$

МРС зубцевої зони ротора

Для значення магнітної індукції $B_{32} = 1.77$ Тл за табл. 4.1 обираємо значення напруженості магнітного поля $H_{32} := 14$ А/см.

Середня довжина шляху магнітного потоку за (4.28)

$$L_{32} := h_{п2} - 0.2 \cdot r_{2p} = 16.28 \text{ мм.}$$

МРС зубців ротора за (4.29)

$$F_{32} := 0.1 \cdot H_{32} \cdot L_{32} = 22.792 \text{ А.}$$

МРС спинки статора

За табл. 4.3 для асинхронного двигуна з $2p=6$ із значенням магнітної індукції у спинці статора $B_{c1} = 1.395$ Тл напруженість магнітного поля за табл. 4.4 $H_{c1} := 3.96$ А/см.

Середня довжина шляху магнітного потоку за (4.40)

$$L_{c1} := \pi \cdot \frac{(D_{н1} - h_{c1})}{4 \cdot p} = 36.285 \text{ мм.}$$

МРС спинки статора за (4.41)

$$F_{c1} := 0.1 \cdot H_{c1} \cdot L_{c1} = 14.369 \text{ А.}$$

МРС спинки ротора

Для значення магнітної індукції $B_{c2} = 0.893$ Тл за табл. 4.6 обираємо значення напруженості магнітного поля $H_{c2} := 0.98$ А/см.

Середня довжина шляху магнітного потоку за (4.43)

$$L_{c2} := \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot \left(D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3} \cdot d_k \right) = 13.155 \text{ мм.}$$

МРС спинки статора за (4.44)

$$F_{c2} := 0.1 \cdot H_{c2} \cdot L_{c2} = 1.289 \text{ А.}$$

Параметри магнітного ланцюга

Сумарна МРС магнітного ланцюга на один полюс за (4.45)

$$F_{\Sigma} := F_{\delta} + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2} = 283.386 \text{ А.}$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга за (4.46)

$$k_{\text{нас}} := \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = 1.246 \text{ .}$$

Намагнічуючий струм за (4.47)

$$I_M := \frac{2.22 \cdot F_\Sigma \cdot p}{m \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}}} = 2.648 \text{ А.}$$

Намагнічуючий струм у в. о. за (4.48)

$$I_{M'} := \frac{I_M}{I_1} = 0.612 \text{ .}$$

ЕРС неробочого ходу за (4.49)

$$E := k_H \cdot U_1 = 207.9 \text{ В.}$$

Головний індуктивний опір за (4.50)

$$x_M := \frac{E}{I_M} = 78.524 \text{ Ом.}$$

Головний індуктивний опір у в. о. за (4.51)

$$x_{M'} := \frac{x_M \cdot I_1}{U_1} = 1.545 \text{ .}$$

Активні та індуктивні опори обмоток

Опір обмотки статора

Активний опір обмотки фази при 20 °С за (5.1)

$$r_1 := \frac{w_1 \cdot l_{\text{cp1}}}{\rho_{\text{М20}} \cdot a_1 \cdot c \cdot S \cdot 10^3} = 3.17 \text{ Ом.}$$

Активний опір обмотки фази при 20 °С у в. о. за (5.2)

$$r_{1'} := \frac{r_1 \cdot I_1}{U_1} = 0.062 \text{ .}$$

Перевірка правильності визначення активного опору фази у в. о.
за (5.3)

$$\frac{\pi \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot J_1 \cdot l_{\text{cp1}}}{114 \cdot 10^4 \cdot m \cdot U_1 \cdot I_1} = 0.062 \text{ .}$$

Коефіцієнти, які враховують скорочення кроку

$$k_{\beta 1} := 0.4 + 0.6 \cdot \beta_1 = 1 \text{ ,}$$

$$k_{\beta 1'} := 0.2 + 0.8 \cdot \beta_1 = 1 \text{ .}$$

За табл. 5.1 визначаємо розміри за рис. 2.1:

- $h_{k1} := 0.7 \text{ мм};$
- $h_2 := 0.6 \text{ мм};$
- $h_3 := 0 \text{ мм}.$

Висота частини пазу, зайнятої обмоткою за (5.4)

$$h_1 := h_{п1} - h_{ш1} - h_{k1} - h_2 - h_3 = 12.3 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт провідності розсіювання за (5.5)

$$\lambda_{п1} := \frac{h_1}{3 \cdot b_2} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_2 + 2 \cdot b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} + \frac{h_2}{b_2} \right) \cdot k_{\beta 1'} = 1.401 \text{ .}$$

Коефіцієнт, який враховує вплив відкритих паців статора на провідність диференційного розсіювання за (5.8)

$$k_{ш1} := 1 - \frac{0.033 \cdot b_{ш1}^2}{t_1 \cdot \delta} = 0.877 \text{ .}$$

Для двигуна із короткозамкненим ротором за табл. 5.2 визначаємо коефіцієнт, який враховує демпфуючу реакцію струмів, що наведені в обмотці короткозамкненого ротора вищими гармоніками поля статора $k_{p1} := 0.991$. За табл. 5.3 визначаємо коефіцієнт диференційного розсіювання статора $k_{д1} := 0.0285$.

Коефіцієнт провідності диференційного розсіювання за (5.9)

$$\lambda_{д1} := \frac{0.9(t_1 \cdot k_{об1})^2 \cdot k_{p1} \cdot k_{ш1} \cdot k_{д1}}{\delta \cdot k_{\delta}} = 4.708 \text{ .}$$

Полюсний поділ за (5.10)

$$\tau := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = 52.36 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт провідності розсіювання лобових частин обмотки за (5.11)

$$\lambda_{л1} := 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{п1} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) = 0.369 \text{ .}$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора за (5.12)

$$\lambda_1 := \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} = 6.478 \text{ .}$$

Індуктивний опір обмотки фази статора за (5.13)

$$x_1 := \frac{1.58 \cdot f \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = 7.226 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки фази статора у в. о. за (5.14)

$$x_{1'} := \frac{x_1 \cdot I_1}{U_1} = 0.142 \text{ .}$$

Перевірка правильності визначення індуктивного опору обмотки фази статора у в.о. за (5.15)

$$\frac{0.39 \cdot D_1^2 \cdot A_1^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot z_1} = 0.142 \text{ .}$$

Опір обмотки ротора

Активні опори стрижня клітки при 20°C за (5.16)

$$r_{ст} := \frac{l_2}{\rho_{a20} \cdot S_{ст} \cdot 10^3} = 9.2 \times 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня за (5.17)

$$k_{пр2} := 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{z_2}\right) = 0.661 \text{ .}$$

Опір короткозамкнених кілець приведений до струму стрижня при 20°C за (5.19)

$$r_{кл} := \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{клср}}{\rho_{a20} \cdot z_2 \cdot S_{кл} \cdot k_{пр2}^2 \cdot 10^3} = 1.443 \times 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Скос пазів ротора здійснюється на одну зубцеву поділку, тоді $\beta_{ск1} := 1$.

Центральний кут скосу пазів за (5.20)

$$\alpha_{ск} := 2 \cdot p \cdot t_1 \cdot \frac{\beta_{ск1}}{D_1} = 0.524 \text{ .}$$

За рис. 5.1 визначаємо $k_{ск} := 0.985$.

Коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора до обмотки статора за (5.21)

$$k_{\text{пр1}} := \frac{4 \cdot m}{z_2} \cdot \left(\frac{w_1 \cdot k_{\text{об1}}}{k_{\text{ск}}} \right)^2 = 2.494 \times 10^4 .$$

Активний опір обмотки ротора при 20°C, приведене до обмотки статора за (5.22)

$$r'_{2} := k_{\text{пр1}} \cdot (r_{\text{ст}} + r_{\text{кл}}) = 2.655 \text{ Ом}.$$

Активний опір обмотки ротора при 20°C, приведене до обмотки статора в умовних одиницях за (5.23)

$$r'_{2'} := \frac{r'_{2} \cdot I_1}{U_1} = 0.052 .$$

Струм стрижня ротора для робочого режиму за (5.24)

$$I_2 := \frac{2 \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot P_2}{U_1 \cdot z_2} \cdot \frac{(0.2 + 0.8 \cdot \cos \varphi)}{\cos \varphi \cdot \eta} = 167.523 \text{ А}.$$

Коефіцієнт провідності розсіяння за (5.25)

$$\lambda_{\text{п2}} := \frac{h_{\text{шр}}}{b_{\text{шр}}} + \frac{h_{1\text{р}} + 0.8 \cdot r_{2\text{р}}}{6 \cdot r_{1\text{р}}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1\text{р}}^2}{2 \cdot S_{\text{ст}}} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{\text{шр}}}{4 \cdot r_{1\text{р}}} = 1.664$$

Кількість пазів ротора на полюс та фазу за (5.27)

$$q_2 := \frac{z_2}{2 \cdot p \cdot m} = 1.556 .$$

За рис. 5.2 $k_{\text{д2}} := 0.049$.

Коефіцієнт провідності диференційного розсіяння ротора диференційного розсіяння ротора за (5.28)

$$\lambda_{\text{д2}} := 0.9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{z_2}{6 \cdot p} \right)^2 \cdot k_{\text{д2}} \cdot \frac{1}{\delta \cdot k_{\delta}} = 3.539 .$$

Коефіцієнт провідності розсіяння короткозамкнених кілець за (5.29)

$$\lambda_{\text{кл}} := \frac{(2.9 \cdot D_{\text{клср}})}{z_2 \cdot l_2 \cdot k_{\text{пр2}}^2} \cdot \log \left(\frac{2.35 \cdot D_{\text{клср}}}{h_{\text{кл}} + l_{\text{кл}}} \right) = 0.118 .$$

Відносний скос пазів у долях зубцевого поділу ротора за (5.30)

$$\beta_{\text{ск2}} := \frac{\beta_{\text{ск1}} \cdot t_1}{t_2} = 0.782 .$$

Коефіцієнт провідності розсіювання скошу пазів за (5.31)

$$\lambda_{\text{ск}} := \frac{t_2 \cdot \beta_{\text{ск}}^2}{9.5 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{\text{нас}}} = 1.712 \quad .$$

Коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора за (5.32)

$$\lambda_2 := \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{кл}} + \lambda_{\text{ск}} = 7.032 \quad .$$

Індуктивний опір обмотки ротора за (5.33)

$$x_2 := 7.9 \cdot f \cdot l_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 3.889 \times 10^{-4} \quad \text{Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора за (5.34)

$$x'_2 := k_{\text{пр1}} \cdot x_2 = 9.699 \quad \text{Ом.}$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора у в. о. за (5.35)

$$x'_{2'} := \frac{x'_2 \cdot I_1}{U_1} = 0.191 \quad .$$

Перевірка правильності визначення

$$\frac{x_1}{x'_{2'}} = 0.745 \quad .$$

Опори обмоток перетвореної схеми заміщення двигуна

Для класу нагрівостійкості ізоляції В за (5.56)

$$m_T := 1 + 0.004 \cdot (75 - 20) = 1.22 \quad .$$

Коефіцієнт розсіювання статора за (5.58)

$$\tau_1 := \frac{x_1}{x_M} = 0.092 \quad .$$

Коефіцієнт опору статора за (5.59)

$$\rho_1 := \frac{r_1 \cdot m_T}{x_1 + x_M} = 0.045 \quad .$$

ЕРС неробочого ходу за (5.60)

$$E_0 := \frac{U_1}{(1 + \tau_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}} = 203.09 \quad \text{В.}$$

Відхилення складає

$$\frac{E - E_0}{E} \cdot 100 = 2.315 \text{ \%}.$$

Відхилення від попередньо розрахованого значення не перевищує 3%.

Перетворені опори обмоток за (5.61)– (5.64)

$$r'_1 := m_T \cdot r_1 = 3.868 \text{ Ом},$$

$$x'_1 := x_1 \cdot (1 + \tau_1) \cdot \left(1 + \frac{r_1 \cdot \rho_1}{x_1}\right) = 8.047 \text{ Ом},$$

$$r''_2 := m_T \cdot r'_2 \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) = 3.87 \text{ Ом},$$

$$x''_2 := x'_2 \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) = 11.59 \text{ Ом}.$$

Режим неробочого ходу

Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні за (6.1)

$$I_{cp} := \frac{U_1}{x_M \cdot (1 + \tau_1) \cdot (1 + \rho_1^2)} = 2.56 \text{ А}.$$

Електричні втрати в обмотці статора при синхронному обертанні за (6.2)

$$P_{cm1} := m \cdot I_{cp}^2 \cdot r'_1 \cdot (1 + \rho_1^2) = 76.222 \text{ Вт}.$$

Розрахункова маса сталі зубців статора за (6.3)

$$m_{z1} := 7.8 \cdot z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{п1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = 2.366 \text{ кг}.$$

Магнітні втрати в зубцях статора за (6.5)

$$P_{z1} := 4.4 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = 31.038 \text{ Вт}.$$

Маса сталі в спинці статора за (6.7)

$$m_{c1} := 7.8 \cdot \pi \cdot (D_{н1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-6} = 4.797 \text{ кг}.$$

Магнітні втрати в спинці статора за (6.8)

$$P_{c1} := 4.4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 41.088 \text{ Вт}.$$

Сумарні магнітні втрати в осерді статора за (6.10)

$$P_{\Sigma} := P_{z1} \cdot \left[1 + 2\sqrt{0.1 \cdot t_1 \cdot (k_\delta - 1)^2}\right] + P_{c1} = 92.226 \text{ Вт}.$$

Механічні втрати за (6.13) при $k_{MX} := 1$

$$P_{MX} := k_{MX} \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{H1}}{100} \right)^4 = 4.929 \text{ Вт.}$$

Активна складова струму неробочого ходу за (6.15)

$$I_{0a} := \frac{(P_{CM1} + P_{CS} + P_{MX})}{m \cdot U_1} = 0.263 \text{ А.}$$

Струм НХ за (6.16)

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{cp}^2} = 2.574 \text{ А.}$$

Коефіцієнт потужності при НХ за (6.17)

$$\cos \phi_0 := \frac{I_{0a}}{I_0} = 0.102 \text{ .}$$

Номинальний режим

Активний опір КЗ за (6.18)

$$r_k := r'_1 + r''_2 = 7.738 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір КЗ за (6.19)

$$x_k := x'_1 + x''_2 = 19.637 \text{ Ом.}$$

Повний опір КЗ за (6.20)

$$z_k := \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = 21.106 \text{ Ом.}$$

Додаткові втрати при номінальному навантаженні за (6.21)

$$P_d := 0.005 \cdot P_2 \cdot \frac{1}{\eta} = 10 \text{ Вт.}$$

Механічна потужність двигуна за (6.22)

$$P'_2 := P_2 + P_{MX} + P_d = 1.515 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Еквівалентний опір схеми заміщення за (6.23)

$$R_H := \frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot P'_2} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot P'_2} - r_k \right)^2 - z_k^2} = 74.382 \text{ Ом.}$$

Повний опір схеми заміщення за (6.24)

$$z_H := \sqrt{(R_H + r_k)^2 + x_k^2} = 84.435 \text{ Ом.}$$

Перевірка розрахунку повного опору схеми заміщення за (6.25)

$$\frac{R_H}{z_H^2} = 0.0104 \text{ Ом}^{-1},$$

$$\frac{P'_2}{m \cdot U_1^2} = 0.0104 \text{ Ом}^{-1}.$$

Ковзання для номінального режиму за (6.26)

$$S_H := \frac{1}{1 + \frac{R_H}{r''_2}} = 0.049 \text{ .}$$

Активна складова струму статора при синхронному обертанні за (6.27)

$$I_{ca} := \frac{P_{c\Sigma} + P_{cm1}}{m \cdot U_1} = 0.255 \text{ A.}$$

Струм ротора за (6.28)

$$I''_2 := \frac{U_1}{z_H} = 2.606 \text{ A.}$$

Активна складова струму статора за (6.29)

$$I_{a1} := I_{ca} + I''_2 \cdot \left(\frac{R_H + r_k}{z_H} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_k}{z_H} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 2.834 \text{ A.}$$

Реактивна складова струму статора за (6.30)

$$I_{p1} := I_{cp} + I''_2 \cdot \left(\frac{x_k}{z_H} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{R_H + r_k}{z_H} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 2.936 \text{ A.}$$

Повний струм статора за (6.31)

$$I_1 := \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = 4.08 \text{ A.}$$

Коефіцієнт потужності за (6.32)

$$\cos \varphi_H := \frac{I_{a1}}{I_1} = 0.7 \text{ .}$$

Лінійне навантаження статора за (6.33)

$$A_1 := 10 \cdot I_1 \cdot \frac{N'_{п1}}{a_1 \cdot t_1} = 191.698 \text{ А/см.}$$

Густина струму в обмотці статора за (6.34)

$$J_1 := \frac{I_1}{c \cdot S \cdot a_1} = 6.009 \text{ А/мм}^2.$$

Лінійне навантаження ротора за (6.35)

$$A_2 := A_1 \cdot I''_2 \cdot (1 + \tau_1) \cdot \frac{\sqrt{1 + \rho_1^2} \cdot k_{о61}}{I_1 \cdot k_{о62} \cdot k_{ск}} = 131.226 \text{ А/см.}$$

Струм в стрижні короткозамкненого ротора за (6.36)

$$I_{ст} := 2 \cdot I''_2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{о61} \cdot (1 + \tau_1) \cdot \frac{\sqrt{1 + \rho_1^2}}{z_2 \cdot k_{ск}} = 147.235 \text{ А.}$$

Густина струму в стрижні короткозамкненого ротора за (6.37)

$$J_{ст} := \frac{I_{ст}}{S_{ст}} = 2.612 \text{ А/мм}^2.$$

Струм у короткозамикальному кільці за (6.38)

$$I_{кл} := \frac{I_{ст}}{k_{пр2}} = 222.894 \text{ А.}$$

Електричні втрати в обмотці статора за (6.39)

$$P_{M1} := m \cdot I_1^2 \cdot r'_1 = 193.174 \text{ Вт.}$$

Електричні втрати в обмотці ротора за (6.40)

$$P_{M2} := m \cdot I''_2^2 \cdot r''_2 = 78.817 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати за (6.41)

$$P_{\Sigma} := P_{M1} + P_{M2} + P_{с\Sigma} + P_{мх\Sigma} + P_d = 379.146 \text{ Вт.}$$

Потужність, яка підведена до двигуна за (6.42)

$$P_1 := P_2 + P_{\Sigma} = 1.879 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт корисної дії за (6.43)

$$\eta := \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1} \right) \cdot 100 = 79.8 \text{ \%}.$$

Правильність розрахунків підтверджується наступними виразами

$$P_1 = 1.879 \times 10^3 \text{ Вт},$$

$$m \cdot I_{a1} \cdot U_1 = 1.8702 \times 10^3 \text{ Вт},$$

$$P_2 = 1.5 \times 10^3 \text{ Вт},$$

$$m \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \frac{\eta}{100} \cos \varphi = 1.505 \times 10^3 \text{ Вт}.$$

Побудова робочих характеристик

Робочі характеристики будуються для значень від $0,25 \cdot P_2$ до $1,25 \cdot P_2$.

$$i := 0..5$$

Розподіл потужності на валу

$$M0_i := 0.25 \cdot P_2 \cdot i.$$

Додаткові втрати

$$M1_i := 0.5 \cdot M0_i \cdot \frac{1}{\eta}.$$

Механічна потужність двигуна

$$M2_i := M0_i + P_{\text{мх}\Sigma} + M1_i.$$

Еквівалентний опір схеми заміщення

$$M3_i := \frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot M2_i} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot M2_i} - r_k \right)^2 - z_k^2}.$$

Повний опір схеми заміщення

$$M4_i := \sqrt{(M3_i + r_k)^2 + x_k^2}.$$

Ковзання

$$M5_i := \frac{1}{1 + \frac{M3_i}{r''_2}}.$$

Струм ротора

$$M6_i := \frac{U_1}{M4_i}$$

Активна складова струму статора

$$M7_i := I_{ca} + M6_i \cdot \left(\frac{M3_i + r_k}{M4_i} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_k}{M4_i} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right)$$

Реактивна складова струму статора

$$M8_i := I_{cp} + M6_i \cdot \left(\frac{x_k}{M4_i} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{M3_i + r_k}{M4_i} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right)$$

Повний струм статора

$$M9_i := \sqrt{(M7_i)^2 + (M8_i)^2}$$

Коефіцієнт потужності

$$M10_i := \frac{M7_i}{M9_i}$$

Електричні втрати в обмотці статора

$$M11_i := m \cdot (M9_i)^2 \cdot r'_1$$

Електричні втрати в обмотці ротора

$$M12_i := m \cdot (M6_i)^2 \cdot r''_2$$

Сумарні втрати

$$M13_i := M11_i + M12_i + P_{c\sigma} + P_{m\sigma} + M1_i$$

Потужність, яка підведена до двигуна

$$M14_i := M0_i + M13_i$$

Коефіцієнт корисної дії

$$M15_i := \left(1 - \frac{M13_i}{M14_i} \right) \cdot 100$$

Отримані дані зведемо до таблиці Г.1.

Робочі характеристики асинхронного двигуна побудовані на одному графіку (рис Г.1) у масштабі:

- для ковзання $m_s := 100000$,
- для повного струму статора $m_I := 1000$,
- для коефіцієнта потужності $m_\varphi := 11000$,
- для коефіцієнта корисної дії $m_\eta := 100$.

Максимальний момент

Змінна частина коефіцієнта статора за (6.46)

$$\lambda_{\pi 13M} := k_{\beta 1'} \cdot \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_2 + 2 \cdot b_{\pi 1}} + \frac{h_{\pi 1}}{b_{\pi 1}} \right) = 0.38 \quad .$$

Складова коефіцієнта провідності розсіяння статора, яка за лежить від насичення за (6.49)

$$\lambda_{13M} := \lambda_{\pi 13M} + \lambda_{d1} = 5.087 \quad .$$

Змінна частина коефіцієнта ротора за (6.50)

$$\lambda_{\pi 23M} := \frac{h_{\pi p}}{b_{\pi p}} = 0.5 \quad .$$

Складова коефіцієнта провідності розсіяння ротора, яка за лежить від насичення за (6.52)

$$\lambda_{23M} := \lambda_{\pi 23M} + \lambda_{d2} = 4.039 \quad .$$

Змінне значення індуктивного опору розсіяння двигуна за (6.53)

$$x_{3M} := \frac{x'_1 \cdot \lambda_{13M}}{\lambda_1} + \frac{x''_2 \cdot \lambda_{23M}}{\lambda_2} = 12.976 \quad \text{Ом.}$$

Постійне значення індуктивного опору розсіяння за (6.54)

$$x_{\text{пос}} := \frac{x'_1 \cdot (\lambda_1 - \lambda_{13M})}{\lambda_1} + \frac{x''_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_{23M})}{\lambda_2} = 6.661 \quad \text{Ом.}$$

Струм ротора, який відповідає максимальному моменту за (6.59)

$$\Gamma''_{M2} := \frac{U_1}{\sqrt{2 \cdot \left[r'_1{}^2 + (x_{\text{пос}} + 0.0825 \cdot x_{3M})^2 + r'_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0.0825 \cdot x_{3M}) \right]}} - \frac{1.24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot \left[r'_1 + 2 \cdot (x_{\text{пос}} + 0.0825 \cdot x_{3M}) \right] \cdot x_{3M}}{2 \cdot N'_{\pi 1} \cdot \left[r'_1{}^2 + (x_{\text{пос}} + 0.0825 \cdot x_{3M})^2 + r'_1 \cdot (x_{\text{пос}} + 0.0825 \cdot x_{3M}) \right]} = 6.145$$

Повний опір схеми заміщення при максимальному моменті за (6.61)

$$z_M := \frac{U_1}{\Gamma''_{M2}} = 35.799 \quad \text{Ом.}$$

Повний опір схеми заміщення при нескінченно великому ковзанні за (6.62)

$$z_{\infty} := 0.5 \cdot \left(\sqrt{r'_{12}{}^2 + 2 \cdot z_M{}^2 - r'_{12}{}^2} \right) = 17.908 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір схеми заміщення при максимальному моменті за (6.63)

$$R_M := z_{\infty} + r'_{12} = 21.775 \text{ Ом.}$$

Кратність максимального моменту за (6.64)

$$\frac{M_{\max}}{M_H} := \frac{m \cdot U_1^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot R_M \cdot P_2} = 2.1 .$$

Ковзання при максимальному моменті за (6.65)

$$s_M := \frac{r''_{12}}{z_{\infty}} = 0.216 .$$

Початковий пусковий струм та початковий пусковий момент

Висота стрижня клітки ротора для закритих пазів ротора за (6.66)

$$h_{\text{ст}} := h_{\text{п2}} - h_{\text{шр}} = 16 \text{ мм.}$$

Приведена висота стрижня ротора за (6.67)

$$\xi := 0.0735 \cdot h_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\frac{s}{m_T}} = 1.065 \text{ мм.}$$

За рис. 6.3 визначаємо коефіцієнти: $\varphi := 0.05$, $\psi := 1.15$.

Розрахункова глибина проникнення струму в стрижень за (6.68)

$$h_p := \frac{h_{\text{ст}}}{1 + \varphi} = 15.238 \text{ мм.}$$

Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму за (6.69)

$$b_p := 2 \cdot r_{1p} - \frac{2 \cdot (r_{1p} - r_{2p})}{h_{1p}} \cdot (h_p - r_{1p}) = 2.124 \text{ мм.}$$

Площа поперечного перетину стрижня при розрахунковій глибині проникнення струму за (6.71)

$$s_p := \frac{\pi}{2} \cdot r_{1p}^2 + \left(r_{1p} + \frac{b_p}{2} \right) \cdot (h_p - r_{1p}) = 55.188 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт витіснення струму за (6.73)

$$k_{BT} := \frac{S_{CT}}{s_p} = 1.021 \quad .$$

Активний опір стрижня клітки для пускового режиму за (6.74)

$$r_{CTII} := r_{CT} \cdot k_{BT} = 9.395 \times 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Активний опір обмотки ротора приведений до обмотки статора за (6.75)

$$r'_{2П} := k_{ПР1} \cdot (r_{CTII} + r_{КЛ}) = 2.703 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт провідності розсіяння паза ротора при пуску за (6.76)

$$\lambda_{П2П} := \frac{h_{шр}}{b_{шр}} + \psi \cdot \left[\frac{h_{1P} + 0.8 \cdot r_{2P}}{6 \cdot r_{1P}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{1P}^2}{2 \cdot S_{CT}} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{шр}}{4 \cdot r_{1P}} \right] = 1.838$$

Коефіцієнт провідності розсіяння обмотки ротора при пуску за (6.78)

$$\lambda_{2П} := \lambda_{П2П} + \lambda_{Д2} + \lambda_{КЛ} + \lambda_{СК} = 7.207$$

Індуктивний опір розсіяння двигуна, яке залежить від насичення за (6.79)

$$x_{3М} := x'_1 \cdot \frac{\lambda_{13М}}{\lambda_1} + x''_2 \cdot \frac{\lambda_{23М}}{\lambda_2} = 12.976 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір розсіяння двигуна, яке не залежить від насичення за (6.80)

$$x_{Пос} := x'_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{13М}}{\lambda_1} + x''_2 \cdot \frac{\lambda_{2П} - \lambda_{23М}}{\lambda_{2П}} = 6.822 \text{ Ом.}$$

Активний опір короткого замикання при пуску за (6.81)

$$r_{КП} := r'_1 + r'_{2П} \cdot m_T \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1)^2 = 8.163 \text{ Ом.}$$

Струм ротора при пуску за (6.82)

$$I''_{П2} := \frac{U_1}{\sqrt{[r_{КП}^2 + (x_{Пос} + 0.0825 \cdot x_{3М})^2]}} - \frac{1.24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot (x_{Пос} + 0.0825 \cdot x_{3М}) \cdot x_{3М}}{N'_{П1} \cdot [r_{КП}^2 + (x_{Пос} + 0.0825 \cdot x_{3М})^2]} = 13.369 \text{ А.}$$

Повний опір схеми заміщення при пуску за (6.84)

$$z_{\text{кп}} := \frac{U_1}{I''_{\text{п2}}} = 16.456 \quad \text{Ом.}$$

Індуктивний опір схеми заміщення при пуску за (6.85)

$$x_{\text{кп}} := \sqrt{z_{\text{кп}}^2 - r_{\text{кп}}^2} = 14.288 \quad \text{Ом.}$$

Активна складова струму статора при пуску за (6.86)

$$I_{\text{па1}} := I_{\text{са}} + I''_{\text{п2}} \cdot \left(\frac{r_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 7.906 \quad \text{А.}$$

Реактивна складова струму статора при пуску за (6.87)

$$I_{\text{пр1}} := I_{\text{са}} + I''_{\text{п2}} \cdot \left(\frac{x_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{r_{\text{кп}}}{z_{\text{кп}}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 11.219 \quad \text{А.}$$

Фазний струм статора при пуску за (6.88)

$$I_{\text{п1}} := \sqrt{I_{\text{па1}}^2 + I_{\text{пр1}}^2} = 13.725 \quad \text{А.}$$

Кратність початкового пускового струму за (6.89)

$$K_{\text{п}} := \frac{I_{\text{п1}}}{I_1} = 3.4 \quad .$$

Активний опір ротора при пуску, приведений до статора при розрахунковій робочій температурі за (6.90)

$$r''_{2\text{п}} := r'_{2\text{п}} \cdot m_{\text{Т}} \cdot (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2) = 3.941 \quad \text{Ом.}$$

Кратність пускового моменту за (6.91)

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} := m \cdot I''_{\text{п2}}^2 \cdot r''_{2\text{п}} \cdot \left(\frac{1 - S_{\text{H}}}{P_2} \right) = 1.34 \quad .$$

Тепловий розрахунок

Коефіцієнт за (7.2)

$$m'_{\text{Т}} := 1 + 0.004 \cdot (120 - 20) = 1.4 \quad .$$

Втрати в обмотці статора при максимальній допущеній температурі за (7.1)

$$P'_{\text{м1}} := m \cdot I_1^2 \cdot m'_{\text{Т}} \cdot r'_1 = 270.444 \quad \text{Вт.}$$

Умовна внутрішня поверхня охолодження активної частини статора за (7.5)

$$S_{\Pi 1} := \pi \cdot D_1 \cdot l_1 = 4.398 \times 10^4 \text{ мм}^2.$$

Умовний периметр поперечного перетину паза за (7.6)

$$\Pi_1 := 2 \cdot h_{\Pi 1} + b_1 + b_2 = 39.6 \text{ мм.}$$

Умовна поверхня охолодження пазів за (7.8)

$$S_{\Pi\Pi} := z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1 = 1.996 \times 10^5 \text{ мм}^2.$$

Умовна поверхня охолодження лобової частини обмотки за (7.9)

$$S_{\Sigma 1} := \pi \cdot 4 \cdot D_1 \cdot l_{B1} = 4.935 \times 10^4 \text{ мм}^2.$$

Умовна поверхня охолодження двигуна без охолоджувальних ребер за (7.10)

$$S_{\text{маш}} := \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{B1}) = 1.023 \times 10^5 \text{ мм}^2.$$

Кількість охолоджуючих ребер на станині за (7.12)

$$n_p := 1.6 \cdot \sqrt[3]{h} = 7.17 \text{ .}$$

Приймаємо $n_p := 8$

Висота охолоджувального ребра за (7.13)

$$h_{VT} := 0.6 \cdot \sqrt[4]{h^3} = 17.532 \text{ мм.}$$

Приймаємо $h_{VT} := 18$.

Умовна поверхня охолодження двигуна з охолоджувальними ребрами за (7.11)

$$S_{\text{машр}} := (\pi \cdot D_{H1} + 8 \cdot n_p \cdot h_{VT}) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{B1}) = 3.541 \times 10^5 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт за табл. 7.1 $k := 0.18$.

Щільність теплового потоку, що генерується сумарними втратами в міді обмотки та активної сталі, розрахована щодо внутрішньої площі охолоджуваної поверхні статора за (7.14)

$$p_{\Pi 1} := k \cdot \frac{\left(2 \cdot P'_{M1} \cdot \frac{l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right)}{S_{\Pi 1}} = 9.988 \times 10^{-4} \text{ Вт/мм}^2.$$

Питомий тепловий потік від втрат в активній частині обмотки, віднесених до поверхні охолодження пазів за (7.15)

$$p_{\text{п1}} := \frac{(2 \cdot P'_{\text{м1}} \cdot l_1)}{S_{\text{п1}} \cdot l_{\text{ср1}}} = 7.607 \times 10^{-4} \text{ Вт/мм}^2.$$

Питомий тепловий потік від втрат від лобових частинах обмотки, віднесених до поверхні охолодження лобових частин обмотки за (7.16)

$$p_{\text{л1}} := \frac{(2 \cdot P'_{\text{м1}} \cdot l_{\text{л1}})}{S_{\text{л1}} \cdot l_{\text{ср1}}} = 2.404 \times 10^{-3} \text{ Вт/мм}^2.$$

Окружна швидкість ротора за (7.17)

$$v_2 := \frac{\pi \cdot D_{\text{н2}} \cdot n_1}{60000} = 5.21 \text{ м/с.}$$

За додатком Б $\alpha_1 := 7.5 \cdot 10^{-5}$.

Перевищення температури внутрішньої поверхні активної частини за (7.18)

$$\Delta t_{\text{п1}} := \frac{p_{\text{п1}}}{\alpha_1} = 13.317 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$\lambda_{\text{екв}} := 16 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм} \cdot \text{град,}$ за рис. 7.1 $\lambda'_{\text{екв}} := 119 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм} \cdot \text{град.}$

Перепад температури в ізоляції паза і катушок за (7.19)

$$\Delta t_{\text{ип1}} := p_{\text{ип1}} \cdot \left[\frac{b_{\text{и1}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \left(\frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) \right] = 1.644 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки над температурою повітря всередині двигуна за (7.22)

$$\Delta t_{\text{л1}} := \frac{p_{\text{л1}}}{\alpha_1} = 32.049 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Одностороння товщина ізоляції обмотки статора за табл. 7.2
 $b_{\text{іл1}} := 0.25 \text{ мм.}$

Перевищення температури в ізоляції лобових частин котушок за (7.23)

$$\Delta t_{i\lambda 1} := p_{\lambda 1} \cdot \left(\frac{b_{i\lambda 1}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h_{\lambda 1}}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} \right) = 6.129 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою повітря всередині двигуна за (7.25)

$$\Delta t'_{11} := (\Delta t_{\pi 1} + \Delta t_{in1}) \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + (\Delta t_{\lambda 1} + \Delta t_{i\lambda 1}) \cdot \frac{2 \cdot l_{\lambda 1}}{l_{cp1}} = 25.145 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Втрати в обмотці ротора при максимальній допустимій температурі за (7.26)

$$P'_{m2} := m \cdot I''_2{}^2 \cdot m'_T \cdot r''_2 = 110.344 \text{ Вт}.$$

Втрати в двигуні, які передаються повітрю всередині двигуна за (7.27)

$$P'_{\Sigma} := k \cdot \left(P'_{m1} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right) + P'_{m1} \cdot \frac{2 \cdot l_{\lambda 1}}{l_{cp1}} + \\ + P'_{m2} + 0.1 \cdot P_{m\Sigma} + P_d = 283.392 \text{ Вт}.$$

Середнє перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою навколишнього повітря без охолоджуючих ребер на станині за (7.29)

$$\Delta t_B := \frac{P'_{\Sigma}}{S_{\text{машр}} \cdot \alpha_B} = 40.019 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури обмотки над температурою навколишнього повітря за (7.30)

$$\Delta t_1 := \Delta t_B + \Delta t'_{11} = 65.164 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вентиляційний розрахунок асинхронного двигуна

Мінімально припустима відстань від нижньої частини корпуса двигуна до опорної площини лап за рис. 7.2 $h_{\lambda} := 5 \text{ мм}.$

Максимально припустимий зовнішній діаметр корпуса за (7.31)

$$D_{\text{корп}} := 2 \cdot (h - h_{\lambda}) = 170 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт, який враховує зміну тепловіддачі до довжині корпусу двигуна у залежності від його діаметра і частоти обертання за (7.32)

$$k_2 := 2.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{n_1^3}{10^9}} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{корп}}}{100}} = 2.868.$$

Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна за (7.33)

$$V_B := \frac{k_2 \cdot P'_\Sigma}{c_B \cdot \Delta t_B} = 0.018 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Необхідна витрата повітря для асинхронного двигуна за (7.34)

$$V'_B := 0.6 \cdot \left(\frac{n_1}{10^5}\right) \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^3 = 0.029 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Напір повітря, що розвивається зовнішнім вентилятором за (7.35)

$$H := 12.3 \cdot \frac{n_1^2}{10^6} \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^2 = 35.547 \text{ Па}.$$

Маса двигуна та динамічний момент інерції ротора

Маса ізовольованих проводів обмотки статора за (8.1)

$$m_{M1} := \left[7.55 + 1.35 \cdot \left(\frac{d'}{d}\right)^2 \right] \cdot z_1 \cdot \frac{N'_{\Pi 1}}{2} \cdot l_{cp1} \cdot c \cdot s \cdot 10^{-6} = 3.348 \text{ кг}.$$

За табл. 8.1 визначаємо кількість вентиляційних лопаток $N_L := 9$.

Маса алюмінію короткозамкненого ротора за (8.3)

$$m_{aL2} := 2.7 \cdot \left[z_2 \cdot S_{CT} \cdot l_2 + 2 \cdot \pi \cdot D_{клср} \cdot S_{кл} + \right. \\ \left. + 1.1 N_L \cdot (l_L - l_{кл}) \cdot h_L \cdot b_L \right] \cdot 10^{-6} = 0.767 \text{ кг}.$$

Маса сталі осердя статора і ротора за (8.4)

$$m_{c\Sigma} := 7.8 \cdot l_1 \cdot k_c \cdot \left[0.785 \cdot (D_{H1}^2 - D_2^2) - \right. \\ \left. - z_1 \cdot s_{\Pi 1} - z_2 \cdot s_{\Pi 2} \right] \cdot 10^{-6} = 13.132 \text{ кг}.$$

Середня ширина паза

$$b_{\Pi} := \frac{b_1 + b_2}{2} = 5.7 \text{ мм.}$$

Маса ізоляції статора за (8.5)

$$m_{i1} := 1.35 \cdot (l_1 + 20) \cdot (2 \cdot h_{\Pi 1} + 3 \cdot b_{\Pi}) \cdot b_{и1} \cdot z_1 \cdot 10^{-6} = 0.088 \text{ кг.}$$

Маса конструкційних матеріалів за (8.7)

$$m_k := (0.25 \cdot D_{н1}^2 \cdot l_1 + 2.6 \cdot D_{н1}^3) \cdot 10^{-6} = 9.378 \text{ кг.}$$

Повна маса двигуна за (8.11)

$$m_{дв} := m_{м1} + m_{ал2} + m_{с\Sigma} + m_{i1} + m_k = 26.713 \text{ кг.}$$

Наближене значення динамічного моменту інерції коротко замкненого ротора за (8.12)

$$J_{ид} := 0.6 \cdot D_{н2}^4 \cdot l_2 \cdot 10^{-12} = 8.233 \times 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Додаток Д

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ЗУБЦЕВОЇ ЗОНИ СТАТОРА І РОТОРА ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ТИПУ 4А280М6УЗ

Розрахунок асинхронного двигуна виконано у програмному засобі Mathcad.

Вихідні дані для проектування:

Тип двигуна – 4А280М6УЗ. Вихідні дані для проектування:

- корисна механічна потужність на валу $P_2 := 90000 \text{ Вт}$;
- синхронна частота обертання $n_1 := 1000 \text{ об/хв.}$;
- номінальна напруга $U_1 := 220 \text{ В}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta := 0.925$;
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi := 0.89$;
- кількість фаз $m := 3$;
- частота $f := 50 \text{ Гц}$.

Електромагнітний розрахунок

Кількість пар полюсів за (1.1)

$$p := \frac{60 \cdot f}{n_1} = 3 \text{ .}$$

Діаметр осердя статора за табл. 1.1

$$D_{H1} := D_{H1\max} = 520 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр осердя статора за табл. 1.2

$$D_1 := 0.71 \cdot D_{H1} = 369.2 \text{ мм.}$$

Приймаємо $D_1 := 370 \text{ мм}$.

Коефіцієнт за рис. 1.2 $k_H := 0.979$.

Розрахункова потужність за (1.2)

$$P' := \frac{k_H \cdot P_2}{\eta \cdot \cos \varphi} = 1.07 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

Обмотка статора – двошарова із проводу прямокутного поперечного перетину, паз статора – прямокутний напівзакритий, ізоляція класу нагрівостійкості – F.

Корегуючий коефіцієнт за табл.1.3 із урахуванням класу нагрівостійкості ізоляції $k_1 := 0.915$.

Електромагнітні навантаження за рис. 1.3

$$A'_1 := 435 \cdot k_1 = 398.025 \text{ А/см.}$$

Корегуючий коефіцієнт за табл.1.3. $k_2 := 1.04$

Магнітна індукція у повітряному зазорі за рис. 1.4

$$B'_\delta := 0.775 \cdot k_2 = 0.806 \text{ Тл.}$$

Обмотковий коефіцієнт приймаємо $k'_{об1} := 0.925$.

Розрахункова довжина магнітопроводу за (1.3)

$$l'_1 := \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A'_1 \cdot B'_\delta \cdot k'_{об1}} = 227.096 \text{ мм.}$$

Приймаємо $l'_1 := 225 \text{ мм.}$

При відсутності радіальних вентиляційних каналів

$$l_1 := l'_1 = 225 \text{ мм.}$$

Довжина осердя ротора

$$l_2 := l_1 = 225 \text{ мм.}$$

Необхідно оцінити правильність розрахунків. За (1.5)

$$\lambda := \frac{l_1}{D_1} = 0.608 \text{ .}$$

Коефіцієнт за табл. 1.6 $k_{nk} := 1.05$.

За табл. 1.5

$$\lambda_{\max} := (1.33 - 0.00087 \cdot D_{H1}) \cdot k_{nk} = 0.921 \text{ .}$$

Перевірка показала $\lambda_{\max} > \lambda$.

Повітряний зазор за табл. 1.8 $\delta := 0.8 \text{ мм.}$

Зовнішній діаметр осердя ротора за (1.6)

$$D_{H2} := D_1 - 2 \cdot \delta = 368.4 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр ротора за (1.8)

$$D_2 := 0.23 \cdot D_{H1} = 119.6 \text{ мм.}$$

Розрахунок зубцевої зони і обмотки статора

Осердя статора виготовлене з електротехнічної сталі марки 2312 товщиною 0,5 мм, коефіцієнт заповнення сталі $k_c := 0.95$.

Кількість пазів на полюс і фазу за табл. 2.2 $q_1 := 4$.

Кількість пазів осердя статора за (2.1)

$$z_1 := 2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1 = 72 \quad .$$

Двошарова обмотка має подовжений крок $\beta_1 := 1.2$.

Крок секції за (2.2)

$$y_{п1} := \frac{z_1 \cdot \beta_1}{2 \cdot p} = 14.4 \quad .$$

Приймаємо $y_{п1} := 15$.

Перерахуємо

$$\beta_1 := y_{п1} \cdot 2 \cdot \frac{p}{z_1} = 1.25 \quad .$$

Коефіцієнт розподілу за (2.3)

$$k_{p1} := \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q_1}\right)} = 0.958 \quad .$$

Коефіцієнт укорочення за (2.4)

$$k_{y1} := \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta_1\right) = 0.924 \quad .$$

Обмотковий коефіцієнт за(2.5)

$$k_{об1} := k_{p1} \cdot k_{y1} = 0.885 \quad .$$

Попереднє значення магнітного потоку за (2.6)

$$\Phi' := B'_8 \cdot D_1 \cdot \frac{l'_1}{p} \cdot 10^{-6} = 0.02237 \quad \text{Вб.}$$

Кількість витків в обмотці фази за (2.7)

$$w'_1 := \frac{k_H \cdot U_1}{222 \cdot k_{об1} \cdot \Phi'} = 49.026 \quad .$$

Кількість паралельних гілок $a_1 := 2$.

Кількість ефективних провідників за (2.8)

$$N'_{п1} := \frac{w'_1 \cdot a_1}{p \cdot q_1} = 8.171 \text{ .}$$

Приймаємо $N'_{п1} := 8$.

Уточнюємо кількість витків в обмотці фази за (2.9)

$$w_1 := \frac{N'_{п1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = 48 \text{ .}$$

Магнітний потік за (2.10)

$$\Phi := \frac{\Phi' \cdot w'_1}{w_1} = 0.0228 \text{ Вб.}$$

Індукція у повітряному зазорі за (2.11)

$$B_{\delta} := \frac{B'_{\delta} \cdot w'_1}{w_1} = 0.823 \text{ Тл.}$$

Відхилення від попередньо визначеного значення індукції у повітряному зазорі за (2.12)

$$\frac{B_{\delta} - B'_{\delta}}{B'_{\delta}} \cdot 100 = 2.138 \text{ \%}.$$

Відхилення за (2.12) знаходиться у межах припустимих значень.

Номинальний фазний струм за (2.13)

$$I_1 := \frac{P_2}{3 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = 165.641 \text{ А.}$$

Лінійне навантаження статора за (2.14)

$$A_1 := \frac{10 \cdot N'_{п1} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = 410.4 \text{ А/см.}$$

Відхилення від попередньо визначеного значення лінійного навантаження статора за (2.15)

$$\frac{A_1 - A'_1}{A'_1} \cdot 100 = 3.109 \text{ \%}$$

Відхилення за (2.15) знаходиться у межах припустимих значень.

Зубцевий поділ по внутрішньому діаметру статора за (2.16)

$$t_1 := \frac{\pi}{z_1} \cdot (D_1) = 16.144 \text{ мм.}$$

За табл. 2.3 обираємо значення індукції:

- у спинці статора $B_{c1} := 1.6 \text{ Тл}$;

- у зубцевій зоні статора у вузькому місці $B_{31\max} := 1.8 \text{ Тл}$.

Зубцева поділка статора у вузькому місці за (2.40)

$$t_{1\min} := \frac{\pi}{z_1} \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{ш1} + 2 \cdot h_k) = 16.493 \text{ мм.}$$

Приймаємо: $h_{ш1} := 1 \text{ мм}$, $h_k := 3.0 \text{ мм}$, $b_{и1} := 1.1 \text{ мм}$, $h_{и1} := 4.5 \text{ мм}$, $b_c := 0.3 \text{ мм}$, $h_c := 0.3 \text{ мм}$.

Ширина зубця у найтоншому місці попередньо за (2.41)

$$b_{31\min} := \frac{t_{1\min} \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{31\max}} = 7.94 \text{ мм.}$$

Приймаємо $b_{31\min} := 8.1 \text{ мм}$.

Перерахуємо значення індукції

$$B_{31\max} := \frac{t_{1\min} \cdot B_\delta}{k_c \cdot b_{31\min}} = 1.764 \text{ Тл.}$$

Ширина напіввідкритого і відкритого паза в штампі за (2.42)

$$b_{п1} := t_{1\min} - b_{31\min} = 8.393 \text{ мм.}$$

Ширина шліца за (2.43)

$$b_{ш1} := 0.6 \cdot b_{п1} = 5.036 \text{ мм.}$$

Кількість ефективних провідників по ширині паза приймаємо $N_{ш} := 2$.

Припустима ширина ефективного провідника із витковою ізоляцією за (2.44)

$$b_{\text{еф}} := \frac{b_{п1} - 2 \cdot b_{и1} - b_c}{N_{ш}} = 2.947 \text{ мм.}$$

Кількість ефективних провідників по висоті паза за (2.45)

$$N_B := \frac{N'_{п1}}{N_{ш}} = 4 \text{ .}$$

Попередньо висота спинки статора за (2.46)

$$h_{c1} := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B_{c1}} = 33.4 \text{ мм.}$$

Висота паза за (2.47)

$$h_{п1} := 0.5 \cdot (D_{н1} - D_1) - h_{c1} = 41.601 \text{ мм.}$$

Припустима висота ефективного провідника із витковою ізоляцією за (2.48)

$$h_{ef} := \frac{1}{N_B} \cdot (h_{п1} - h_{и1} - h_k - h_{ш1} - h_c) = 8.2 \text{ мм.}$$

Площа ефективного провідника за (2.49)

$$S_{ef} := h_{ef} \cdot b_{ef} = 24.164 \text{ мм}^2.$$

Для напіввідкритих пазів:

$$S_{допmax} := 10\text{мм}, b_{допmax} := 4.7 \text{ мм}, a_{допmax} := 2.12 \text{ мм.}$$

Кількість елементарних провідників попередньо за (2.50)

$$c' := \frac{S_{ef}}{S_{допmax}} = 2.416 \text{ .}$$

Приймаємо $c' := 3$.

Попередньо кількість ефективних провідників за (2.52) і (2.53)

$$c_b := \frac{b_{ef}}{b_{допmax}} = 0.627 \text{ .}$$

Приймаємо $c_b := 1$.

$$c_a := \frac{c'}{c_b} = 3 \text{ .}$$

Приймаємо $c_a := 4$, тоді загальна кількість ефективних провідників за (2.51)

$$c' := c_a \cdot c_b = 4 \text{ .}$$

Менший розмір неізолюваного елементарного проводу за (2.54)

$$a' := \frac{h_{ef}}{c_a} - \Delta_n = 1.9 \text{ мм.}$$

Більший розмір неізолюваного елементарного проводу за (2.55)

$$b' := \frac{b_{\text{сф}}}{c_b} - \Delta_{\text{и}} = 2.797 \text{ мм.}$$

За табл. А3 (Додаток А) обираємо розміри елементарного провідника: $a := 2 \text{ мм}$, $b := 2.8 \text{ мм}$, $S := 5.237 \text{ мм}^2$.

Розмір паза в штампі по висоті за (2.56)

$$h_{\text{п1}} := N_{\text{в}} \cdot c_a \cdot (a + \Delta_{\text{и}}) + h_{\text{и1}} + h_{\text{с}} = 39.2 \text{ мм.}$$

Розмір паза в штампі по ширині за (2.57)

$$b_{\text{п1}} := N_{\text{ш}} \cdot c_b \cdot (b + \Delta_{\text{и}}) + 2 \cdot b_{\text{и1}} + b_{\text{с}} = 8.4 \text{ мм.}$$

Уточнюємо значення ширини зубця за (2.42)

$$b_{31\text{min}} := t_{1\text{min}} - b_{\text{п1}} = 8.093 \text{ мм.}$$

Уточнюємо значення висоти спинки статора за (2.47)

$$h_{\text{с1}} := 0.5 \cdot (D_{\text{н1}} - D_{\text{л}}) - h_{\text{п1}} = 35.8 \text{ мм.}$$

Уточнюємо значення магнітної індукції у вузькій частині зубця за (2.41)

$$B_{31\text{max}} := \frac{t_{1\text{min}} \cdot B_{\delta}}{k_{\text{с}} \cdot b_{31\text{min}}} = 1.766 \text{ Тл.}$$

Уточнюємо значення магнітної індукції у спинці статора за (2.46)

$$B_{\text{с1}} := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_{\text{с}} \cdot l_1 \cdot h_{\text{с1}}} = 1.493 \text{ Тл.}$$

Густина струму в обмотці статора за (2.33)

$$J_1 := \frac{I_1}{c' \cdot S \cdot a_1} = 3.954 \text{ А/мм}^2.$$

Правильність розрахунку перевіряємо за добутком лінійного навантаження на густину струму

$$A_1 \cdot J_1 = 1.623 \times 10^3 \text{ А}^2/\text{мм}^2 \cdot \text{см.}$$

За рис. 2.2 $A'_1 \cdot J'_1 := 2080 \text{ А}^2/\text{мм}^2 \cdot \text{см}$. Значення з рис. 2.2 при класі ізоляції F необхідно помножити на коефіцієнт за табл. 2.5 $k_{\text{пр}} := 0.87$.

Порівняємо розраховане значення із рекомендованим

$$\frac{A_1 \cdot J_1 - 2080 \cdot k_{\text{пр}}}{2080 \cdot k_{\text{пр}}} \cdot 100 = -10.336 \text{ \%}.$$

Розраховане значення збігається із точністю у 15%.

Середній зубцевий поділ статора за (2.58)

$$t_{cp1} := \pi \cdot \frac{(D_1 + h_{п1})}{z_1} = 17.855 \text{ мм.}$$

Середня ширина котушки статора за (2.59)

$$b_{cp1} := t_{cp1} \cdot y_{п1} = 267.821 \text{ мм.}$$

Середня довжина однієї лобової частини обмотки за (2.60)

$$l_{л1} := 1.3 \cdot b_{cp1} + h_{п1} + 50 = 437.367 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка обмотки за (2.61)

$$l_{cp1} := 2 \cdot (l_{л1} + l_1) = 1.325 \times 10^3 \text{ мм.}$$

Довжина вильота лобової частини обмотки за (2.62)

$$l_{в1} := 0.4 \cdot b_{cp1} + 0.5 \cdot h_{п1} + 25 = 151.728 \text{ мм.}$$

Розрахунок зубцевої зони і обмотки ротора

Для висоти вісі обертання 280 мм паз ротору – лопатковий закритий, ротор короткозамкнений, матеріал – алюміній. Гранично припустиме значення індукції у зубцевій зоні ротора за табл. 3.1 $B_{z2} := 1.717$ Тл. Кількість пазів ротора за табл. 3.3 $z_2 := 82$. Висотапазу ротора за рис. 3.1 $h_{п2} := 36$ мм. Пази без скосу.

Розрахункова висота спинки ротора за (3.2)

$$h_{c2} := \frac{D_{н2} - D_2}{2} - h_{п2} = 88.4 \text{ мм.}$$

Магнітна індукція в спинці ротора за (3.3)

$$B_{c2} := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_2 \cdot h_{c2}} = 0.893 \text{ Тл.}$$

Визначене за (3.3) значення магнітної індукції у спинці ротора не перевищує максимально припустиме за табл. 3.4.

Зубцевий поділ по зовнішньому діаметру ротора за (3.4)

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_{н2}}{z_2} = 14.114 \text{ мм.}$$

Для закритого пазу відповідно до рис. 3.3:

- $h_{2p} = 0.5 \text{ мм};$
- $h_p = 15 \text{ мм.}$

Ширина зубця у нижній частині за (3.11)

$$b_{зн2} := \frac{t_2 \cdot B_8}{B_{32} \cdot k_c} = 7.123 \text{ мм.}$$

Менший радіус пазу за (3.12)

$$r_{2p} := \frac{\pi \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_{п2}) - z_2 \cdot b_{зн2}}{2 \cdot (z_2 - \pi)} = 2.2 \text{ мм.}$$

Більший радіус пазу за (3.13)

$$r_{1p} := \frac{\pi \cdot (D_{н2} - 2 \cdot h_p - 2 \cdot h_{2p}) - z_2 \cdot b_{зн2}}{2 \cdot (z_2 + \pi)} = 2.8 \text{ мм.}$$

Відстань між центрами радіусів за (3.14)

$$h_{1p} := h_{п2} - h_p - h_{2p} - r_{1p} - r_{2p} = 15.5 \text{ мм.}$$

Перевірка правильності визначення більшого та меншого радіусу пазів ротора за (3.15)

$$\pi \cdot h_{1p} - z_2 \cdot (r_{1p} - r_{2p}) = -0.505 \approx 0 \text{ мм.}$$

Ширина верхньої частини стрижня за (3.16)

$$b_p := r_{1p} \cdot k_p = 2.8 \text{ .}$$

Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня за (3.17)

$$S_{стн} := 0.5 \cdot (r_{1p}^2 + r_{2p}^2) \cdot \pi + (r_{1p} + r_{2p}) \cdot h_{1p} = 97.418 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перетину нижньої частини стрижня за (3.18)

$$S_{ств} := b_p \cdot (h_p - 0.11 \cdot b_p) = 41.138 \text{ мм}^2.$$

Загальна площа поперечного перетину стрижня за (3.19)

$$S_{ст} := S_{стн} + S_{ств} = 138.555 \text{ мм}^2.$$

Навчальний посібник

ЛАПКІНА Світлана Олександрівна

**ПРОЕКТУВАННЯ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
ІЗ КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ
ДЛЯ ВИСОТИ ВІСІ ОБЕРТАННЯ ДО 355 ММ**

для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія»

Навчальний посібник

Комп'ютерний набір: *Лапкіна С.О.*

Комп'ютерна верстка: *Лапкіна С.О.*

Підписано до друку 29.06.2026. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 8,66.

Тираж 100 прим. Зам. № 482.

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.