

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ
з дисципліни «Електричні машини та апарати. Частина 2»
для студентів спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка освітнього ступеня
«Бакалавр» денної та заочної форм навчання

УДК 621.311

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні машини та апарати. Частина 2» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітнього ступеня «Бакалавр» денної та заочної форм навчання [Електронний ресурс] / укладач: Е.М. Нємцев. – Луцьк: ДонНТУ, 2023. – 116 с.

Укладач: Нємцев Е.М., старший викладач кафедри електричної інженерії ДонНТУ.

Рецензент: Калиниченко В.В., доцент кафедри прикладної механіки ДонНТУ, канд. техн. наук, доцент.

Відповідальний за випуск: Колларов О.Ю., зав. каф. електричної інженерії ДонНТУ, канд. техн. наук, доцент.

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол №___ від _____р.

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії
протокол №___ від _____р.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	5
1 СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ, ВИМОГИ ДО ЇЇ ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ	7
1.1 Структура розрахунково-пояснювальної записки	7
1.2 Вимоги до оформлення розрахунково-пояснювальної записки курсової роботи	9
1.3 Захист курсової роботи	10
2 ВАРІАНТИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ	12
3 ПОРЯДОК ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	14
3.1 Розрахунок кінематичних і геометричних параметрів	14
3.2 Розрахунок статора	20
3.2.1 Розрахунок обмотки статора	20
3.2.2 Розрахунок розмірів зубцевої зони статора та повітряного зазору	28
3.2.3 Конструювання обмотки статора	35
3.3 Розрахунок значення повітряного зазору	38
3.4 Розрахунок короткозамкненого ротора	39
3.5 Розрахунок магнітного кола	47
3.6 Розрахунок параметрів номінального режиму роботи двигуна ...	54
3.7 Відносні параметри асинхронного двигуна	60
3.8 Втрати в асинхронному двигуні	61
3.9 Розрахунок робочих характеристик асинхронного двигуна	67
3.10 Приклад розрахунку асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором	71
3.10.1 Розрахунок кінематичних і геометричних показників асинхронного двигуна	71

3.10.2 Розрахунок статора і обмотки статора	74
3.10.3 Розрахунок розмірів зубцевої зони статора	78
3.10.4 Конструювання обмотки статора	80
3.10.5 Розрахунок повітряного зазору	82
3.10.6 Розрахунок короткозамкненого ротора	82
3.10.7 Розрахунок магнітного кола	87
3.10.8 Розрахунок параметрів номінального режиму роботи двигуна	91
3.10.9 Втрати в асинхронному двигуні	95
3.10.10 Розрахунок робочих характеристик	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	107
ДОДАТОК А. Приклад оформлення титульної сторінки курсової роботи	108
ДОДАТОК Б. Схеми трифазних обмоток асинхронних двигунів	109

ВСТУП

Електричні машини є важливим елементом у сучасному промисловому та побутовому обладнанні, адже вони відповідають за перетворення електричної енергії в механічну та навпаки. З розвитком технологій та збільшенням потреби в електричній енергії, постійно вдосконалюються та оптимізуються різні типи електричних машин, серед яких асинхронні двигуни займають значне місце. Асинхронні двигуни відрізняються від інших видів електричних машин своїми характеристиками, конструкцією та принципом роботи. У зв'язку з цим, їх вивчення та розрахунок є актуальним завданням для студентів, що спеціалізуються в галузі електроенергетики.

Метою курсової роботи з дисципліни «Електричні машини та апарати. Частина 2» є освоєння теоретичних основ та практичних навичок, пов'язаних з електричним, магнітним та конструктивним розрахунком асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Завдання курсової роботи передбачає розуміння основних принципів роботи асинхронних двигунів, вивчення їх характеристик та властивостей, а також розвиток навичок їх проектування та оптимізації.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є одним з найпоширеніших типів електричних машин, що використовуються в різних галузях промисловості, будівництва, транспорту та побутового обслуговування. Основні переваги асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором полягають у їх надійності, простоті конструкції, економічності та можливості регулювання швидкості обертання. Вони забезпечують стабільну роботу в широкому діапазоні навантажень та здатні витримувати великі перевантаження, що робить їх універсальним рішенням для багатьох застосувань.

Для успішного виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні машини та апарати. Частина 2», студентам необхідно оволодіти рядом теоретичних знань та практичних навичок, зокрема:

- ознайомитись з основними принципами роботи, класифікацією та характеристиками асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором,
- вивчити особливості електричного, магнітного та конструктивного розрахунків асинхронних двигунів, включаючи розрахунок параметрів обмоток статора та ротора, розрахунок магнітної індукції, визначення механічних параметрів та оптимізацію розмірів двигуна,
- ознайомитись з основами проектування асинхронних двигунів, враховуючи вимоги до енергоефективності, робочого середовища, технічних характеристик та безпеки,
- розвиток навичок аналізу та синтезу асинхронних двигунів, використання сучасних програмних засобів для розрахунків та моделювання роботи двигунів.
- вміння коректно виконувати технічну документацію, оформлення результатів розрахунків та аналізу асинхронних двигунів.

У ході виконання курсової роботи студенти набудуть необхідних компетенцій та вмінь для проектування, розрахунку та аналізу асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, які допоможуть їм у подальшій професійній діяльності та наукових дослідженнях. Курсова робота дає можливість поглибити знання з дисципліни «Електричні машини та апарати. Частина 2», що сприятиме розвитку загальної електротехнічної компетентності студентів.

Завдання курсової роботи передбачає проведення електричних, магнітних та конструктивних розрахунків асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на основі заданих вхідних даних, а також підготовку технічної документації та звіту з результатами розрахунків. У процесі виконання курсової роботи студенти зможуть оцінити ефективність різних конструктивних варіантів асинхронних двигунів.

1 СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ, ВИМОГИ ДО ЇЇ ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ

1.1 Структура розрахунково-пояснювальної записки

Курсова робота виконується у вигляді розрахунково-пояснювальної записки, яка повинна містити такі частини: титульний аркуш, зміст, вступ, основну частину, висновки, список використаних джерел, додатки (за необхідності).

ТИТУЛЬНИЙ АРКУШ

Титульний аркуш курсової роботи містить найменування міністерства вищого навчального закладу, факультету, кафедри; прізвище, ім'я, по батькові студента; найменування дисципліни та тему курсової роботи; науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові викладача, який керує виконанням курсовою роботою; місто і рік виконання (приклад титульного аркуша наведено у додатку А).

ЛИСТ ЗАВДАННЯ

Завдання на курсову роботу видається індивідуально кожному студенту. На листі завдання повинні міститися вихідні дані та матеріали, що знадобляться при його виконанні.

АНОТАЦІЯ

У анотації визначається кількість сторінок, таблиць, рисунків та кількість використаних джерел інформації, наводиться короткий зміст роботи, основні висновки, ключові слова.

ЗМІСТ

Зміст містить найменування та номери початкових сторінок усіх розділів, підрозділів (пунктів) та підпунктів, якщо вони мають заголовок.

ВСТУП

У вступі визначається вибрана для дослідження проблема, підкреслюється її актуальність, ілюструється ступінь її вивченості, а також роль і значимість її

у відповідній області науки чи практики. Проводиться аналіз використаних джерел і літератури, встановлюються об'єкт, предмет, ціль і задачі, а також методологія дослідження.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У основній частині викладається його сутнісна складова, яка розбивається на розділи, кількість яких визначається задачами, що вирішуються. Розділи, за необхідності, можуть включати підрозділи (пункти) та підпункти.

Представлення тексту курсової роботи повинно включати проблему, яку необхідно викласти. Відповідний матеріал розкривається згідно з його сутності у вигляді окремих розділів. Кожен розділ повинен висвітлювати окремий незалежний аспект, а підрозділ – специфічну (конкретизовану) частину цього аспекту.

Розділи основної частини необхідно доповнювати ілюстраціями, рисунками, кресленнями, схемами і т.п.

ВИСНОВКИ

Висновки являють собою логічне завершення курсової роботи. Їх основне завдання – узагальнення результатів виконаної роботи. Висновки представляються у вигляді коротких підсумків, пропозицій та мають відповідати визначеним цілям.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ (БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК)

Список використаних ресурсів (джерел) розташовується після висновків, та має містити ресурси, на які були використані при виконанні роботи та на які є посилання у тексті розрахунково-пояснювальної записки. Посилання на використані джерела (літературу) повинні бути обов'язково відображені в тексті роботи.

ДОДАТКИ

Матеріали, які з тієї чи іншої причини не можуть бути включені до основної частини курсової роботи, але пов'язані з її виконанням, розміщуються в додатках. Це можуть бути різноманітні довідкові матеріали, таблиці, схеми, нормативні документи, приклади документів, інструкції,

методики, матеріали розроблені протягом виконання роботи, допоміжні ілюстрації, формули тощо.

Кожен додаток повинен бути розміщений з нової сторінки та мати заголовок, який друкується угорі сторінки прописними літерами (наприклад, ДОДАТОК А. Графічна частина).

1.2 Вимоги до оформлення розрахунково-пояснювальної записки курсової роботи

Курсова робота виконується шляхом здійснення розрахунків кінематичних, конструктивних та енергетичних показників роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Пояснювальна записка оформляється відповідно до вимог, викладеними у методичних вказівках та повинні відповідати вимогам ДСТУ 3008-2015 [1].

Пояснювальна записка повинна містити титульний лист, анотацію, зміст, введення (вступ), розрахунки показників, аналіз отриманих даних, рекомендації, висновки, список використаної літератури (джерел інформації).

Текст роботи розміщується на аркушах формату А4 (210x297). Поля: зверху і знизу – 20 мм, зліва – 25 мм, праворуч – 15 мм.

Основний текст: шрифт – Times New Roman. Розмір – 14 пт. Шрифт друку – чорного кольору, не жирний. Міжрядковий інтервал – полуторний. Абзац (новий рядок) – 10 мм. Вирівнювання по ширині. У таблицях допускається застосування розміру шрифту у 12 пт та одинарного інтервалу.

Основні розділи (глави) пояснювальної записки нумеруються «арабськими» цифрами: 1, 2 і т.д. Підрозділи (підпункти) нумеруються подвійними арабськими цифрами: перша цифра – номер розділу, друга цифра – номер підрозділу, починаючи з цифри 1 (наприклад, 3.4 означає, що це 4-й підрозділ 3-го розділу).

При написанні курсової роботи обов'язково необхідно робити посилання на інформаційні джерела зі списку використаних джерел.

Нумерацію сторінок подають арабськими цифрами без знаку «№» у верхньому правому куті аркуша (без крапки в кінці). Першою сторінкою курсової роботи є титульний аркуш, який підлягає загальній нумерації сторінок, але номер на ньому не проставляється.

1.3 Захист курсової роботи

Для здачі курсової роботи для реєстрації та перевірки, усі окремі завдання необхідно роздрукувати на аркушах формату А4. У разі дистанційного навчання виконана робота надсилається викладачу у відповідній команді Teams або на його корпоративну пошту з корпоративної пошти студента.

До захисту курсової роботи допускаються студенти, які у встановлений термін здали на кафедру належним чином оформлену роботу після її перевірки керівником та усунення недоліків, виявлених після перевірки.

У разі відсутності оформленої належним чином та захищеної курсової роботи, або незадовільного захисту роботи, студент не допускається до складання іспиту з однойменної дисципліни.

Процедура захисту включає: доповідь студента про зміст роботи, усні відповіді запитання, прийняття колегіального рішення щодо оцінки роботи, виставлення оцінок (відомість, залікова книжка).

Доповідь необхідно готувати заздалегідь у формі усного виступу, в якому доцільно висвітлити такі питання: обґрунтування актуальності теми дослідження; мета, завдання, об'єкт, предмет дослідження; що вдалося встановити, виявити; якими методами це досягнуто; стислі висновки по кожному розділу курсової роботи, загальні результати розрахунків. Доповідь студента не повинна перевищувати 5–7 хвилин. Під час захисту студент повинен намагатися дати вичерпні відповіді на всі питання та зауваження.

Оцінка за курсову роботу виставляється за результатами публічного захисту перед комісією у складі 2-3 осіб, під час якого оцінюється рівень презентації, глибина опанування студентом досліджуваної теми, вміння вести

дискусію, обговорювати та відстоювати свою точку зору та рішення, правильність відповідей на поставлені запитання.

Оцінка курсової роботи включає бали за виконання роботи та за захист (для усіх форм навчання):

Пояснювальна записка	Захист роботи	Максимальний бал
40	60	100

Оцінювання проводиться з урахуванням вимог «Положення про організацію освітнього процесу». Результати підсумкового контролю оцінюються за 100-бальною шкалою та чотирибальною («відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно»). Відповідність між шкалами встановлюється наступним чином:

Оцінка	
за 100-бальною шкалою	для курсового проекту (роботи)
90-100	відмінно
74-89	добре
60-73	задовільно
0-59	незадовільно

2 ВАРІАНТИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

У табл. 2.1 наведено варіанти даних для розрахунку асинхронного двигуна з короткозамкненими ротором.

Номер варіанта визначається викладачем і видається кожному студенту індивідуально.

Таблиця 2.1 – Варіанти даних для розрахунку асинхронного двигуна з короткозамкненими ротором

№ варіанта	Номінальна потужність двигуна	Синхронна частота обертання	Номінальна фазна напруга живлення двигуна	Число фаз статора	Частота напруги живлення	Коефіцієнт потужності	ККД	Матеріал статора і ротора двигуна	Матеріал статорної обмотки	Матеріал роторних стрижнів	Температура обмоток статора	Температура стрижнів ротора
	Вт	об./хв.	В	–	Гц	–	–	–	–	–	°С	°С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1000	500	220	3	50	0,75	0,850	Сталь 2013	Мідь	Алюміній	70	40
2	2000	500	220	3	50	0,76	0,900	Сталь 2312	Мідь	Мідь	75	50
3	3000	500	220	3	50	0,77	0,950	Сталь 2013	Алюміній	Латунь	80	60
4	4000	500	220	3	50	0,78	0,925	Сталь 2312	Алюміній	Алюміній	85	70
5	5000	750	220	3	50	0,79	0,900	Сталь 2013	Латунь	Мідь	90	80
6	6000	500	380	3	50	0,80	0,875	Сталь 2312	Мідь	Алюміній	95	90
7	7000	500	380	3	50	0,81	0,850	Сталь 2013	Мідь	Мідь	100	85
8	8000	500	380	3	50	0,82	0,825	Сталь 2312	Алюміній	Латунь	105	80
9	9000	750	380	3	50	0,83	0,800	Сталь 2013	Алюміній	Алюміній	110	75
10	10000	750	380	3	50	0,84	0,810	Сталь 2312	Латунь	Мідь	115	70

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	11000	750	380	3	50	0,85	0,820	Сталь 2013	Мідь	Латунь	120	65
12	12000	750	380	3	50	0,84	0,830	Сталь 2312	Мідь	Алюміній	125	60
13	13000	1000	660	3	50	0,83	0,840	Сталь 2013	Алюміній	Мідь	130	75
14	14000	750	660	3	50	0,82	0,850	Сталь 2312	Алюміній	Алюміній	135	65
15	15000	750	660	3	50	0,81	0,860	Сталь 2013	Латунь	Мідь	140	75
16	16000	750	660	3	50	0,80	0,870	Сталь 2312	Мідь	Латунь	145	85
17	17000	1000	660	3	50	0,79	0,860	Сталь 2013	Мідь	Алюміній	150	95
18	18000	1000	660	3	50	0,78	0,850	Сталь 2312	Алюміній	Мідь	145	90
19	19000	1000	1140	3	50	0,80	0,840	Сталь 2013	Алюміній	Латунь	140	85
20	20000	1000	1140	3	50	0,82	0,830	Сталь 2312	Латунь	Алюміній	135	80
21	21000	750	1140	3	50	0,84	0,820	Сталь 2013	Латунь	Мідь	130	75
22	22000	1000	1140	3	50	0,86	0,810	Сталь 2312	Мідь	Алюміній	125	70
23	23000	500	1140	3	50	0,88	0,800	Сталь 2013	Мідь	Мідь	120	65
24	24000	1000	1140	3	50	0,90	0,825	Сталь 2312	Алюміній	Латунь	115	70
25	25000	1500	660	3	50	0,88	0,850	Сталь 2013	Алюміній	Алюміній	110	75
26	26000	1500	660	3	50	0,86	0,875	Сталь 2312	Латунь	Мідь	105	80
27	27000	750	380	3	50	0,84	0,900	Сталь 2013	Мідь	Мідь	100	85
28	28000	1500	380	3	50	0,82	0,925	Сталь 2312	Мідь	Алюміній	95	80
29	29000	1500	220	3	50	0,80	0,875	Сталь 2013	Алюміній	Мідь	90	75
30	30000	1500	220	3	50	0,78	0,825	Сталь 2312	Алюміній	Латунь	85	70

3 ПОРЯДОК ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

3.1 Розрахунок кінематичних і геометричних параметрів [2–4]

Синхронна кутова швидкість вала двигуна:

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \text{ рад/с} \quad (3.1)$$

де p – число полюсів:

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_1} \quad (3.2)$$

Число пар полюсів позначається як « $2p$ ».

Знаючи значення потужності, розрахункове значення пар полюсів та застосований ступінь захисту двигуна за рис. 3.1 обирають висоту осі обертання.

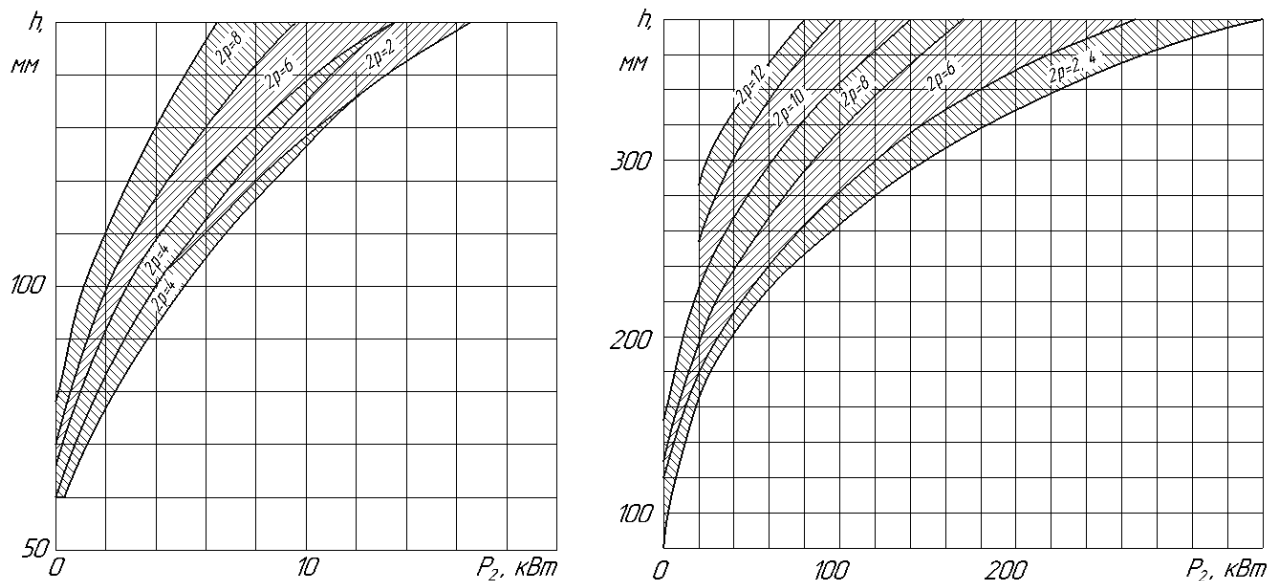


Рисунок 3.1 – Визначення висоти осі обертання h (м) двигунів у залежності від потужності, числа пар полюсів та ступеню захисту двигуна [2]

За попередньо визначеним значенням висоти осі обертання приймають його стандартне значення і обирають зовнішній діаметр статора (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Стандартні значення висоти осі обертання двигуна і відповідні діаметри статора асинхронного двигуна [2]

h , мм	56	63	71	80	90	100	112	132
D_a , м	0,089	0,10	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225

Продовження таблиці 3.1

h , мм	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a , м	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Значення внутрішнього діаметра статора, м:

$$D = k_D \cdot D_a \quad (3.3)$$

де k_D – коефіцієнт, який характеризує відношення внутрішнього діаметра осердя статора асинхронного двигуна до зовнішнього діаметра (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта k_D [2]

2р	2	4	6	8–12
k_D	0,52–0,57	0,64–0,68	0,70–0,72	0,74–0,77

Розрахункова потужність:

$$P_p = P \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi}, \text{ Вт}, \quad (3.4)$$

де k_E – коефіцієнт, який визначає відношення ЕРС обмотки статора до значення номінальної напруги (рис. 3.2).

η – попереднє значення ККД асинхронного двигуна – за рис. 3.3.

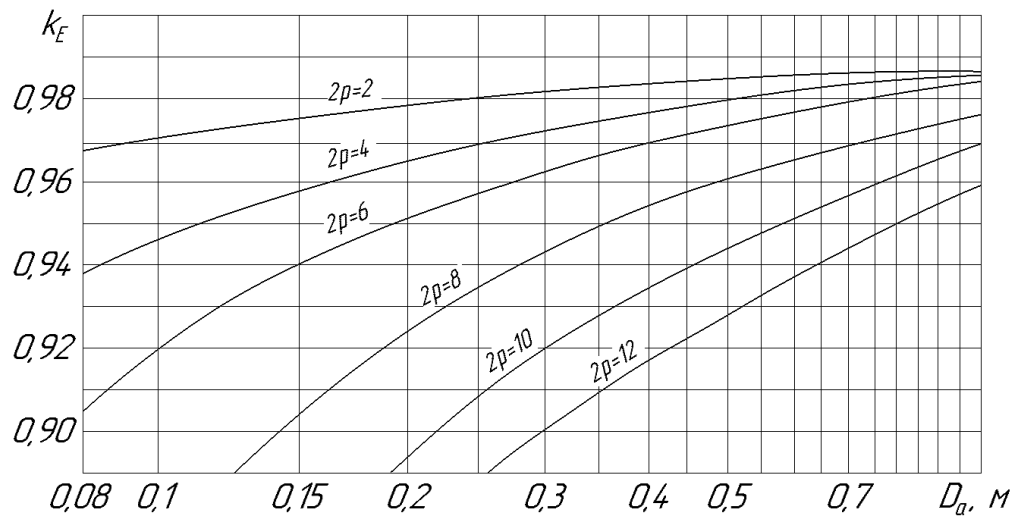
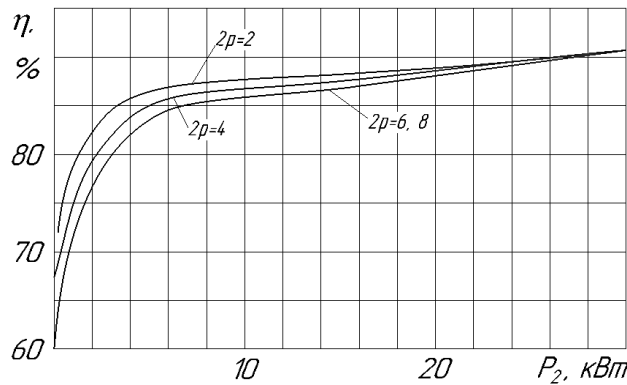
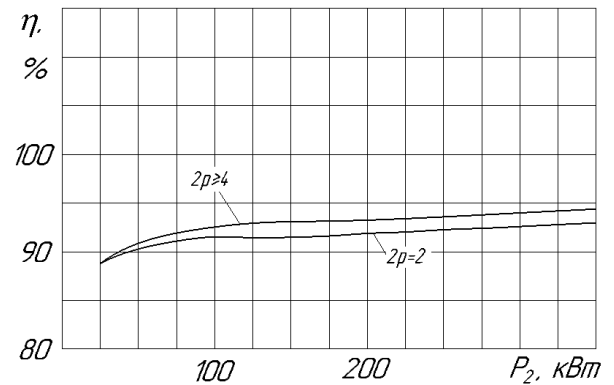


Рисунок 3.2 – Попереднє визначення коефіцієнта k_E [2]



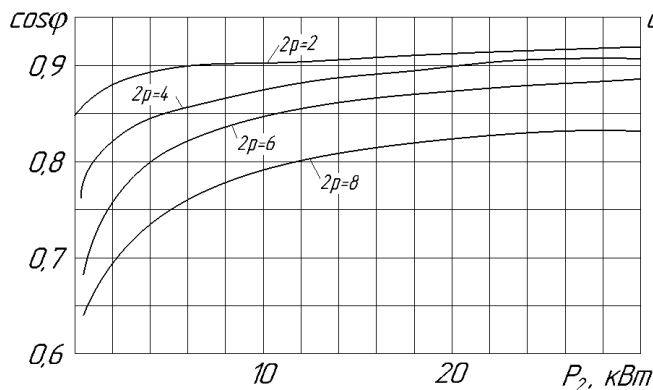
а)



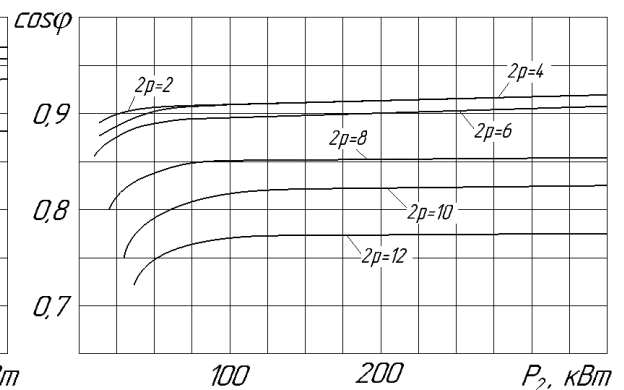
б)

Рисунок 3.3 – Попереднє визначення значення ККД (η) асинхронних двигунів:

а – потужністю до 30 кВт, б – потужністю до 400 кВт [2]



а)



б)

Рисунок 3.4 – Попереднє визначення значення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$) асинхронних двигунів:

а – потужністю до 30 кВт,

б – потужністю до 400 кВт [2]

Розрахункова довжина повітряного зазору:

$$\ell_{\delta} = \frac{P_p}{D^2 \cdot \Omega \cdot k_B \cdot k_{o\delta 1} \cdot A \cdot B_{\delta}}, \text{ м}, \quad (3.5)$$

де k_B – коефіцієнт форми поля:

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (3.6)$$

$k_{o\delta 1}$ – обмотковий коефіцієнт: для одношарових обмоток знаходиться в межах 0,90 – 0,96.

A – електромагнітне навантаження, яке залежить від числа пар полюсів – рис. 3.5.

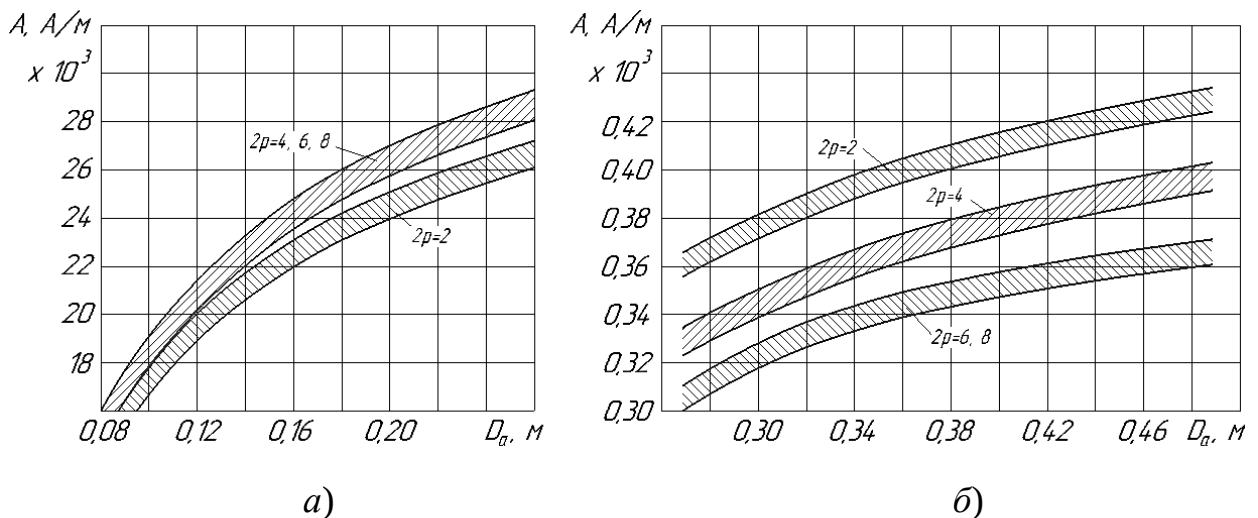


Рисунок 3.5 – Електромагнітні навантаження (A , А/м) асинхронних двигунів:

a – при висоті осі обертання $h \leq 120$ мм, b – при висоті осі обертання

$160 \leq h \leq 250$ мм [2]

B_{δ} – магнітна індукція, яка також залежить від числа пар полюсів – рис. 3.6.

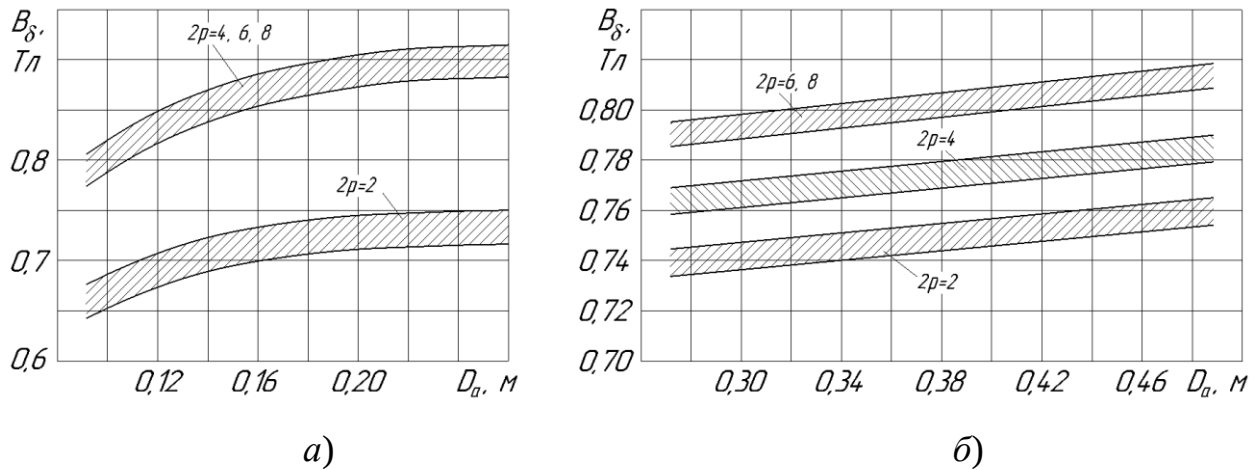


Рисунок 3.6 – Магнітна індукція (B_δ , Тл) асинхронних двигунів: *a* – при висоті осі обертання $h \leq 132$ мм, *б* – при висоті осі обертання $160 \leq h \leq 250$ мм [2]

Критерій «правильності»:

$$\lambda = \frac{\ell_\delta}{\tau} \quad (3.7)$$

де τ – полюсний поділ статора:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \text{ м.} \quad (3.8)$$

Значення λ для прийнятого виконання електричної машини повинно знаходитись у межах, що показано на рис. 3.7.

У разі, коли λ виявляється занадто великим, необхідно повторити розрахунок, прийнявши інше (більше) найближче значення осі обертання зі стандартного ряду. В разі, коли λ виявляється занадто малим, необхідно повторити розрахунок, прийнявши інше (менше) найближче значення осі обертання зі стандартного ряду. Після цього значення λ уточнюється і знову перевіряється.

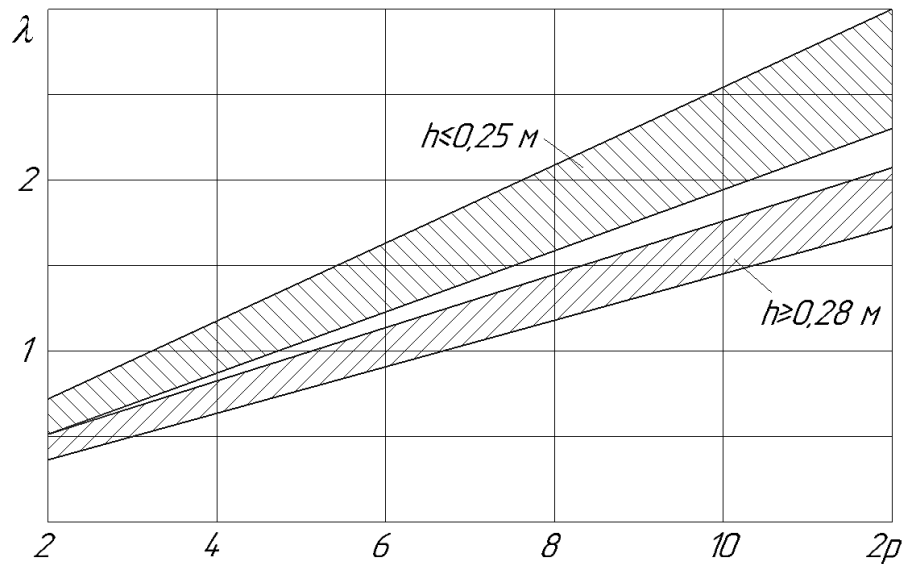


Рисунок 3.7 – Критерій «правильності» [2]

У асинхронних двигунах, у яких довжина осердь не перевищує 250–300 мм відсутня необхідність облаштування радіальних вентиляційних каналів і осердя шихтуються (набираються з однакових кілець) в один пакет. Для такої конструкції значення повної конструктивної довжини ротора, статора і повітряного зазору рівні між собою:

$$\ell_1 = \ell_{cm1} = \ell_\delta, \text{ м} \quad (3.9)$$

У електричних машинах з довгими осердями, останні поділяють на окремі пакети довжиною $\ell_{\text{нак}} = 40\text{--}60$ мм, при цьому крайні пакети можуть бути виконані дещо довгими.

Для двигунів з литою короткозамкненою обмоткою ротора число пакетів через складність заливки зменшують і пакети виконують довгими.

Радіальний повітряний канал між пакетами облаштовують канал шириною $b_k = 10$ мм. Число пакетів приймають цілим після розрахунків за формулою:

$$n_{\text{нак}} = \frac{\ell_{cm}}{\ell_{\text{нак}}}. \quad (3.10)$$

Кількість радіальних каналів:

$$n_k = n_{nak} - 1. \quad (3.11)$$

Конструктивну довжину сердечника ротора асинхронних машин, для яких висота осі обертання $h < 250$ мм, приймають дорівнюючою довжині осердя статора:

$$\ell_2 = \ell_1 \quad (3.12)$$

У габаритних асинхронних двигунах ротор виконують довшим за статор шляхом збільшення довжини його крайніх пакетів на 5 мм, а у великих машинах високої напруги – на 10 мм.

Довжина сталі сердечника ротора:

$$\ell_{cm2} = \Sigma \ell_{nak} = \ell_2 - n_k b_k, \text{ м.} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \quad (3.15)$$

3.2 Розрахунок статора

3.2.1 Розрахунок обмотки статора

Завданням розрахунку обмотки статора є визначення числа пазів статора (Z_1), числа витків у статорній обмотці (w_1) та перерізу дроту цієї обмотки.

Для здійснення розрахунку зазначених параметрів попередньо обирається зубцевий поділ статора – рис. 3.8.

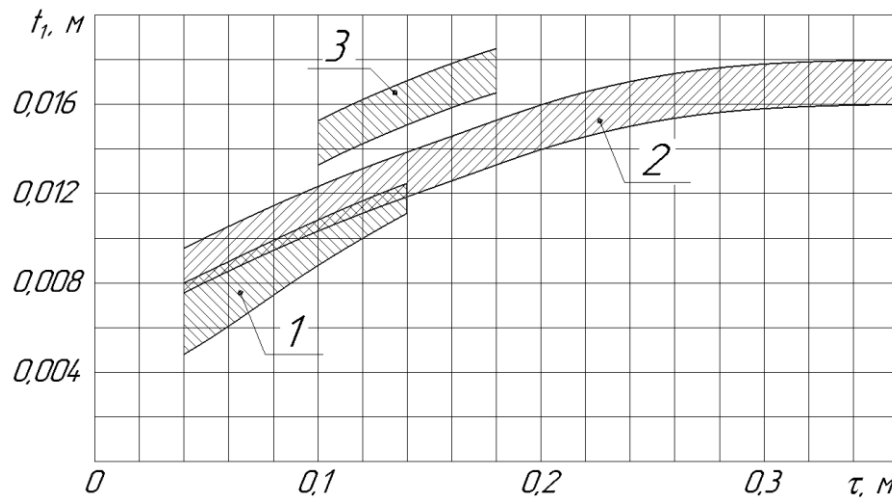


Рисунок 3.8 – До визначення зубцевого поділу (t_1) статора двигунів із всипною обмоткою: 1 – для двигунів з висотою осі обертання $h \leq 90$ мм, 2 – для двигунів з висотою осі обертання $90 < h \leq 250$ мм, 3 – для багатополюсних двигунів з висотою осі обертання $h \geq 250$ мм [3]

За графіком рис. 3.8 необхідно обрати два значення зубцевого поділу – мінімальне t_{1min} і максимальне t_{1max} значення. Тоді можлива кількість пазів статора буде дорівнювати:

$$z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1max}} \quad (3.16)$$

$$z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1min}} \quad (3.17)$$

Число пазів на полюс та фазу:

$$q_{1min} = \frac{z_{1min}}{2p \cdot m} \quad (3.18)$$

$$q_{1max} = \frac{z_{1max}}{2p \cdot m} \quad (3.19)$$

Кінцеву кількість пазів обираємо з інтервалу від z_{1min} і z_{1max} з урахуванням вимог симетрії обмотки і необхідного числа пазів на полюс і фазу (q). Бажано, щоб останнє число було цілим, а зубцевий поділ статора (t_1) не повинен виходити за зазначені межі більше ніж на 10% але у будь-якому разі для двигунів з $h > 56$ мм не повинно бути меншим за 6–7 мм.

Число ефективних провідників у пазу u_n бажано приймати цілим або парним. Для цього визначають попереднє число ефективних провідників у пазу u'_n за умови, що паралельні гілки в обмотці відсутні ($a = 1$):

$$u'_n = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1n} \cdot z_1}, \quad (3.20)$$

де I_{1n} – номінальний струм у статорній обмотці:

$$I_{1n} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1H\phi} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \text{ A}, \quad (3.21)$$

де U_{1n} – значення номінальної напруги живлення двигуна, В.

Число ефективних провідників у пазу:

$$u_n = a \cdot u'_n \quad (3.22)$$

Кількість паралельних гілок у обмотці (a) можна брати лише з дозовлених значень можливих чисел паралельних гілок для обмотки даного типу і заданого числа полюсів.

Отримане число u_n округляється до найближчого цілого або парного у залежності від типу обмотки.

Число витків у фазі обмотки статора:

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} \quad (3.23)$$

Остаточне значення лінійного навантаження:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1H} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D}, \text{ A/м.} \quad (3.24)$$

Отримане значення лінійного навантаження порівнюють з раніше прийнятим значенням – відмінність не повинна перевищувати інженерну похибку (5%):

$$\frac{A_2 - A_1}{A_2} \cdot 100\% \leq 5\% \quad (3.25)$$

Схему обмотки статора обирають у залежності від потужності електричної машини:

- при потужності до 12–15 кВт у більшості випадків застосовують одношарову концентричну обмотку,
- при потужності більше 15 кВт обмотки виконують двошаровими,
- при механізованому укладанні застосовують однодвошарові або двошарові концентричні обмотки, які можна укласти в пази без підйому кроку,
- обмотки, виконані з прямокутного дроту, виконують лише двошаровими.

Обмотковий коефіцієнт:

$$k_{об1} = k_y \cdot k_p \quad (3.26)$$

де k_y – коефіцієнт укорочення, який враховує зменшення ЕРС витка. Для електричних машин з одношаровою обмоткою $k_y = 1$, у інших випадках:

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \beta \quad (3.27)$$

β – розрахункове укорочення двошарових обмоток, виконаних з однією великою котушкою в котушковій групі:

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} \quad (3.28)$$

k_p – коефіцієнт розподілу, що враховує зменшення ЕРС у пазах обмотки для першої гармоніки:

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2 \cdot q \cdot m}} \quad (3.29)$$

Обмотковий коефіцієнт двошарової концентричної обмотки дорівнює обмотковому коефіцієнту звичайної двошарової обмотки, на базі якої побудована концентрична.

Для двошарових обмоток асинхронних двигунів крок виконують здебільшого з укороченням, що є близьким до $\beta = 0,8$.

Розраховане уточнене значення $k_{обм1}$ дозволяє більш точно визначити значення потоку у повітряному зазорі:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1н}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{обм1} \cdot f_1}, \text{Вб.} \quad (3.30)$$

Уточнене значення індукції у повітряному зазорі:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot \ell_\delta}, \text{Тл.} \quad (3.31)$$

Отримане значення індукції порівнюють з раніше прийнятим значенням – відмінність не повинна перевищувати інженерну похибку (5%):

$$\frac{B_{\delta 2} - B_{\delta 1}}{B_{\delta 2}} \cdot 100\% \leq 5\% \quad (3.32)$$

Перетин ефективних провідників визначаємо виходячи зі струму однієї паралельної гілки і припустимої щільності струму в обмотці:

$$q_{ef1} = \frac{I_{1H}}{a \cdot J_1}, \text{ м}^2, \quad (3.33)$$

де J_1 – щільність струму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{(AJ_1)}{A}, \text{ А/м}^2, \quad (3.34)$$

де (AJ_1) – добуток лінійного навантаження на щільність струму – рис. 3.9.

Діаметр одного ефективного провідника для розрахованого значення перерізу ефективного провідника:

$$d_{ef} = 2 \cdot \sqrt{\frac{q_{ef1}}{\pi}}, \text{ м}. \quad (3.35)$$

У обмотках, призначених для механізованого укладання, діаметр ізольованого дроту зазвичай беруть не більшим за 1,4 мм, а в разі ручного укладання – не більше ніж 1,7 мм.

Якщо розрахунковий переріз ефективного провідника в машинах із всипною обмоткою вищий за значення, що відповідають зазначеним діаметрам, то ефективний провідник розділяють на кілька елементарних. За табл. 3.3 підбирають переріз $q_{ел}$ і число елементарних провідників $n_{ел}$, що у сумі складуть значення одного ефективного провідника, таким чином, щоб діаметр $d_{ел}$ елементарних провідників не виходив за визначені межі, а їх сумарна площа перерізу була близькою до розрахункового перерізу ефективного провідника:

$$q_{ел} \cdot n_{ел} \approx q_{ef1} \quad \text{або} \quad q_{ел} \approx \frac{q_{ef1}}{n_{ел}} \quad (3.36)$$

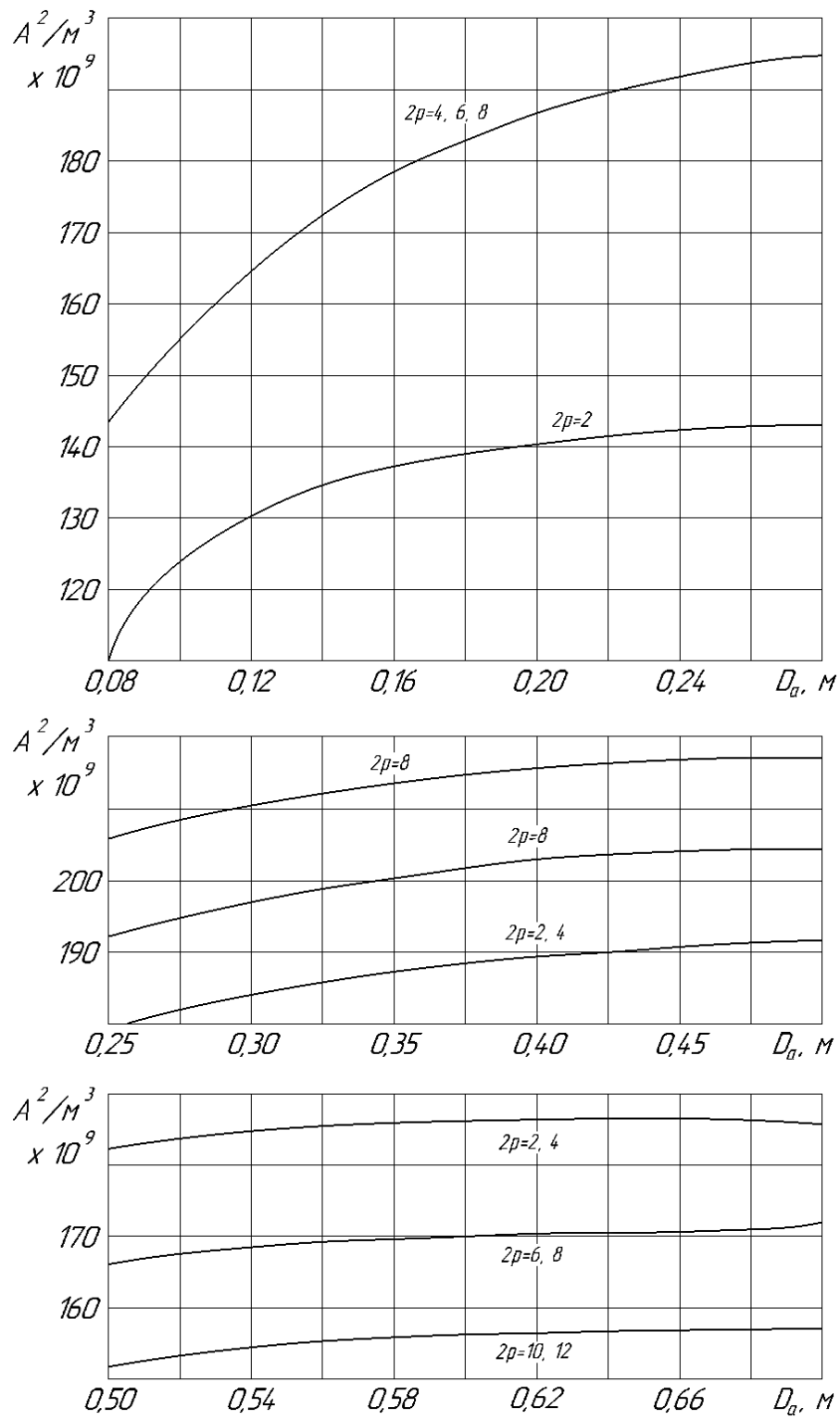


Рисунок 3.9 – Середні значення добутку (AJ) асинхронних двигунів: *a* – для двигунів з висотою осі обертання $h \leq 132$ мм, *б* – для двигунів з висотою осі обертання $160 < h \leq 250$ мм, *в* – для двигунів з висотою осі обертання $280 < h \leq 355$ мм [3]

Таблиця 3.3 – Характеристики провідників марок ПЕТВ тв ПЕТ-155 [4]

Номінальний діаметр неізолюваного дроту, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного проводу, мм	Площа поперечного перерізу неізолюваного проводу, мм ²
0,125	0,147	0,01227
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,180	0,01767
0,16	0,190	0,0201
0,17	0,200	0,0227
0,18	0,210	0,0255
0,20	0,230	0,0314
0,224	0,259	0,0394
0,25	0,285	0,0491
0,28	0,315	0,0616
0,315	0,350	0,0779
0,335	0,370	0,0881
0,355	0,395	0,0990
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,440	0,1257
0,425	0,465	0,1419
0,45	0,490	0,1590
0,50	0,545	0,1963
0,56	0,615	0,2460
0,60	0,655	0,283
0,63	0,690	0,312
0,71	0,770	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,080	0,785
1,06	1,140	0,883
1,12	1,200	0,985
1,18	1,260	1,094
1,25	1,330	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011

При проектуванні електричних машин прагнуть зменшити число елементарних провідників в одному ефективному до 5–6, а в обмотці, призначеній для механізованого укладання, до 2–3, для чого збільшують число паралельних гілок. У двополюсних двигунах $n_{ел}$ збільшують, оскільки число паралельних гілок у них не може бути більше двох.

Після остаточного вибору $q_{ел}$, $n_{ел}$ і a необхідно уточнити щільність струму в обмотці:

$$J = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{ел} \cdot n_{ел}}, \text{А/м}^2. \quad (3.37)$$

За табл. 3.3 обирають обмотувальний провід відповідного укладання і записуються:

- площа поперечного перерізу неізолюваного дроту, $q_{ел}$, м^2 ,
- середнє значення діаметра ізолюваного дроту, $d_{із}$, м,
- номінальний діаметр неізолюваного дроту, $d_{ел}$, м.

3.2.2 Розрахунок розмірів зубцевої зони статора та повітряного зазору

Форма пазів і зубців статора визначається у залежності від потужності електричної машини та типом обмотки. Розміри зубцевої зони розраховуються за припустимим значенням індукції у ярмі та зубцях (табл. 3.4).

За обраними значеннями індукцій визначаємо висоту ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c}, \text{м}, \quad (3.38)$$

де k_c – коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю (табл. 3.5).

Таблиця 3.4 – Припустимі значення індукції на різних ділянках магнітного ланцюга [4]

Дільниця магнітного кола	Позначення	2p				
		2	4	6	8	10, 12
Ярмо статора	B_a	1,40–1,60			1,15–1,35	1,10–1,20
Зубці статора при постійному перерізі (всипна обмотка)	B_{Z1}	1,70–1,90				1,60–1,80
Зубці статора в найбільш вузькому перерізі: при напіввідкритих пазах	B_{Z1max}	1,75–1,95				
при відкритих пазах	B_{Z1max}	1,60–1,80				
Ярмо короткозамкненого ротора	B_j	≤1,45	≤1,25	≤1,15	0,85	
Зубці ротора при постійному перерізі (грушоподібні пази)	B_{Z2}	1,75–1,85				
Зубці короткозамкненого ротора в найбільш вузькому перерізі	B_{Z2}	–	1,50–1,70	1,45–1,60		

Таблиця 3.5 – Коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю [4]

h , мм	Марка сталі	Статор		Короткозамкнений ротор	
		Спосіб ізоляції листів	k_c	Спосіб ізоляції листів	k_c
50–250	2013	Оксидування	0,97	Оксидування	0,97
280–355	2312	Лакування	0,95	Оксидна плівка	0,97

У пазах обмотувальні дроти круглої форми при застосуванні всипної обмотки можуть бути покладені довільно. Через це розміри зубцевої зони повинні бути такими, щоб зубці статора мали паралельні грані, мати постійний поперечний переріз (рис. 3.10).

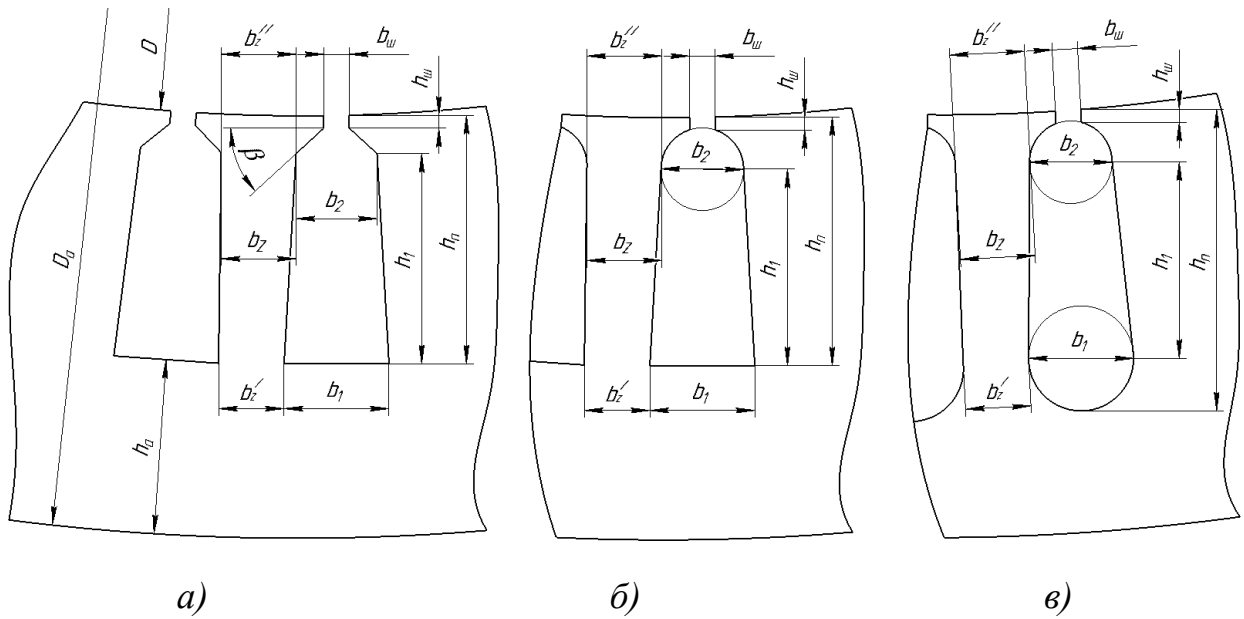


Рисунок 3.10 – Розміри зубцевої зони всипної обмотки статора

У роботі рекомендується застосувати трапецієвидні пази з кутом нахилу граней клинової частини $\beta = 45^\circ$ для двигунів з $h < 250$ мм і $\beta = 30^\circ$ для двигунів з $h > 280$ мм.

Спочатку здійснюємо попередній вибір розмірів, виходячи з припустимої індукції в зубцях і ярмі статора:

$$b_Z = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot \ell_\delta}{B_{zcp} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c}, \text{ м.} \quad (3.39)$$

Розміри паза у штампі:

$$h_{n1} = \frac{D_a - D}{2} - h_a, \text{ м,} \quad (3.40)$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z_1} - b_{Z1}, \text{ м,} \quad (3.41)$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D \cdot \tan \beta + 2 \cdot h_w \cdot \tan \beta - b_w) - Z_1 \cdot \tan \beta \cdot b_{Z1}}{Z_1 \cdot \tan \beta - \pi}, \text{ м.} \quad (3.42)$$

де $h_{\text{ш}}$ – висота шліца паза, для двигунів з $h < 132$ мм приймають $h_{\text{ш}} = 0,5$ мм, при $h > 160$ мм – $h_{\text{ш}} = 1$ мм.

$b_{\text{ш}}$ – ширина шліца пазу, табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Середнє значення ширини шліца пазу [4]

h , мм	$2p$				
	2	4	6–8	10	12
50–63	1,8			—	
71	2,0			—	
80, 90	3,0		2,7	—	
100, 112	3,5		3,0	—	
132	4,0	3,5		—	
160–250	4,0	3,7		—	
280–315	—			4,0	4,0

Площа поперечного перерізу паза в штампі:

$$S_n = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1, \text{ м}^2, \quad (3.43)$$

де h_1 – висота шліца паза:

$$h_1 = h_{n1} - (h_{\text{ш}} + h_{\kappa}), \text{ м}, \quad (3.44)$$

де h_{κ} – висота клинової частини паза:

– при $\beta = 45^\circ$:

$$h_{\kappa} = \frac{b_2 - b_{\text{ш}}}{2}, \quad (3.45)$$

– при $\beta = 30^\circ$:

$$h_{\kappa} = \frac{b_2 - b_{\text{ш}}}{2\sqrt{3}}, \quad (3.46)$$

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

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - S_{iz} - S_{np}, \text{ м}^2, \quad (3.47)$$

де b'_1, b'_2, h'_1 – розміри паза у світлі,

$$\begin{aligned} b'_1 &= b_1 - \Delta b_n, \text{ м}, \\ b'_2 &= b_2 - \Delta b_n, \text{ м}, \\ h'_1 &= h_1 - \Delta h_n, \text{ м}, \end{aligned} \quad (3.48)$$

де $\Delta b_n, \Delta h_n$ – припуски на шихтовку і збирання осердь (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Припуски на збирання при розрахунку заповнення пазів [4]

h , мм	Припуски, мм	
	по ширині паза, Δb_n	по висоті паза, Δh_n
50–132	0,1	0,1
160–250	0,2	0,2
280–355	0,3	0,3
400–560	0,4	0,3

S_{iz} – площа корпусної ізоляції:

$$S_{iz} = b_{iz} \cdot (2 \cdot h_{n1} + b_1 + b_2), \text{ м}^2, \quad (3.49)$$

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

S_{np} – площа прокладок у пазу, м^2 :

– для одношарової обмотки $S_{np} = 0$,

– для $180 \leq h \leq 250$ мм: $S_{np} = 0,4 \cdot b_1 - 0,9 \cdot b_2$,

– для $h \geq 280$ мм: $S_{np} = 0,6 \cdot (b_1 + b_2)$.

Таблиця 3.8 – Ізоляція одношарових та двошарових всипних обмоток статорів асинхронних двигунів [4]

Тип обмотки	Висота осі	Позиція	Одностороння товщина, мм
Одношарова	50–80	1	0,2
		2	0,3
	90–132	1	0,25
		2	0,35
	160	1	0,40
		2	0,50
Двошарова	80-250	1	0,40
		2	0,40
		3	0,50

Для перевірки правильності розміщення обмотки в пазах визначаємо значення коефіцієнта заповнення паза і порівнюємо його з припустимими значеннями $k_z = 0,7-0,75$:

$$k_z = \frac{d_{iz}^2 \cdot u_n \cdot n_{el}}{S_n'} \quad (3.50)$$

Якщо розраховане значення буде нижчим меншого значення 0,7, то площу паза слід зменшити за рахунок збільшення величин h_a та/або b_z . Це тягне за собою зменшення індукції в зубцях і ярмі статора (табл. 3.4) і завищення головних розмірів двигуна. Якщо це досягає критичних значень необхідно зменшити довжину сердечника або обрати меншу висоту осі обертання.

Якщо розраховане значення буде вищим за значення 0,75, його можна спробувати зменшити шляхом зменшення величин h_a та/або b_z ; прийняти більше значення перерізу елементарного дроту при зменшенні величини n_{el} ; збільшити довжину магнітопроводу або змінити головні розміри двигуна.

Ширину зубця і розрахункову висоту паза визначають за формулами у відповідності до обраної форми пазу (рис. 3.10):

– для рис. 3.10а:

$$\begin{aligned} b'_z &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z_1} - b_{1, \text{м}}, \\ b''_z &= \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{n1} - h_1)]}{Z_1} - b_{2, \text{м}}, \\ h_z &= h_{n1, \text{м}}, \end{aligned} \quad (3.51)$$

– для рис. 3.10б:

$$\begin{aligned} b'_z &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z_1} - b_{1, \text{м}}, \\ b''_z &= \frac{\pi \cdot D + 2 \cdot h_{\text{ш}} + b_2}{Z_1} - b_{2, \text{м}}, \\ h_z &= h_{n1, \text{м}}, \end{aligned} \quad (3.52)$$

– для рис. 3.10в:

$$\begin{aligned} b'_z &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1} - b_1)}{Z_1} - b_{1, \text{м}}, \\ b''_z &= \frac{\pi \cdot D + 2 \cdot h_{\text{ш}} + b_2}{Z_1} - b_{2, \text{м}}, \\ h_z &= h_{n1} - 0,1 \cdot b_{1, \text{м}}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

При застосуванні всіпної обмотки можна вважати, що $b_z = b'_z = b''_z$. У разі наявної розбіжності значень b'_z і b''_z , необхідно здійснити розрахунок обох цих значень, а за кінцеве значення прийняте середнє розрахункове значення між ними. В разі значної розбіжності рекомендується змінити співвідношення розмірів пазів.

3.2.3 Конструювання обмотки статора

Статорні обмотки являють собою досить складну просторову конструкцію, що складається з розміщених у пазах ізольованих провідників, з'єднаних за спеціальними схемами.

Найпростішим елементом обмотки є виток, який складається з двох послідовно з'єднаних провідників, розміщених у пазах, що знаходяться, як правило, під сусідніми полюсами. Провідники витка, що розташовані у пазах статора, є його активними сторонами. Частини витка, що знаходяться поза пази (розташовані по торцях магнітопроводу), призначені для з'єднання між собою активних провідників і називаються лобовими частинами.

Провідники, що утворюють виток, можуть складатися з кількох паралельних дротів – це дозволяє зробити обмотку більш «м'якою» та полегшити її укладання в пази статора.

Один або декілька послідовно з'єднаних витків утворюють котушку або секцію обмотки.

Обмотка, що складається з багатовиткових секцій, називається котушковою. Якщо у секції наявний лише один виток, таку обмотку називають стрижневою (провідники у цьому випадку являють собою жорсткі стрижні, наприклад, у короткозамкненому роторі).

Котушка (секція) обмотки, характеризується числом витків і кроком – кількістю охоплюваних нею зубців магнітопроводу.

Наприклад, якщо одна сторона котушки (секції) лежить у першому пази, а друга – у восьмому, то котушка охоплює сім зубців і крок її дорівнює семи ($y = 7$). Тобто, «крок» (y) – це різниця між номерами пазів, у які вкладено обидві сторони котушки ($y = 8 - 1 = 7$) – математичний розрахунок і позначається як ($y = 1-8$) – запис. Крок обмотки називають діаметральним, якщо він дорівнює полюсному поділу ($y = \tau = Z/2p$).

Якщо крок котушки менше діаметрального, його називають укороченим, та характеризують коефіцієнтом укорочення $k_y = y/\tau$ ($k_y = 0,65-0,85$). Цей

прийом широко застосовують в обмотках статорів трифазних асинхронних електродвигунів для економії обмотувального дроту, полегшення укладання обмотки та покращення характеристик двигунів.

Розрізняють одношарові обмотки, у яких кожен паз зайнято стороною однієї котушки (секції), та двошарові, в пазах яких розміщують сторони різних котушок (секцій) у два шари.

Обмотки містять велику кількість провідників, що унеможливорює зображення всіх з'єднань і всіх провідників на кресленні – для цього використовують схематичне зображення. Широкого розповсюдження набули два способи зображення обмоток на схемах:

– схема-розгортка або розгорнута – поверхню осердя разом з обмоткою «подумки» розрізають по утворюючій і розгортають на площину креслення (рис. 3.11),

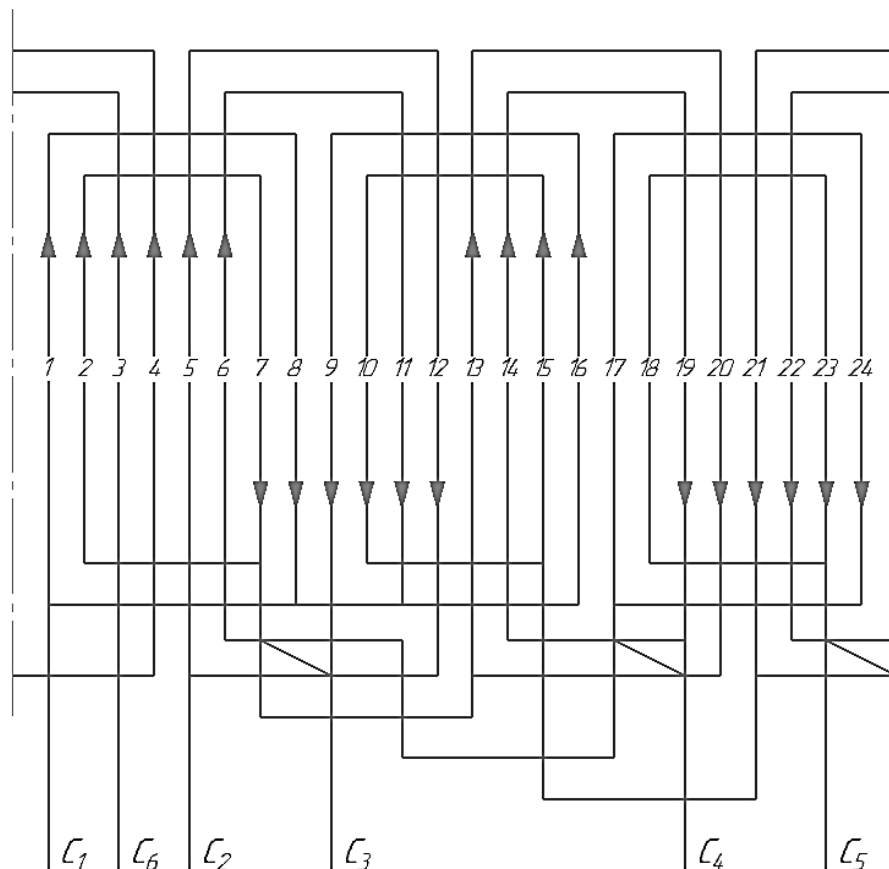


Рисунок 3.11 – Спосіб зображення обмоток у вигляді схеми-розгортки
(трифазна одношарова концентрична обмотка при $Z = 24$, $2p = 4$)

– кругова або торцева – обмотку проектують на площину, перпендикулярну осі сердечника та показують вид обмотки з торця; провідники (або активні сторони секцій та котушок), розташовані в пазах на поверхні сердечника, зображують кружками і показують торцеві (лобові) з'єднання обмотки (рис. 3.12).

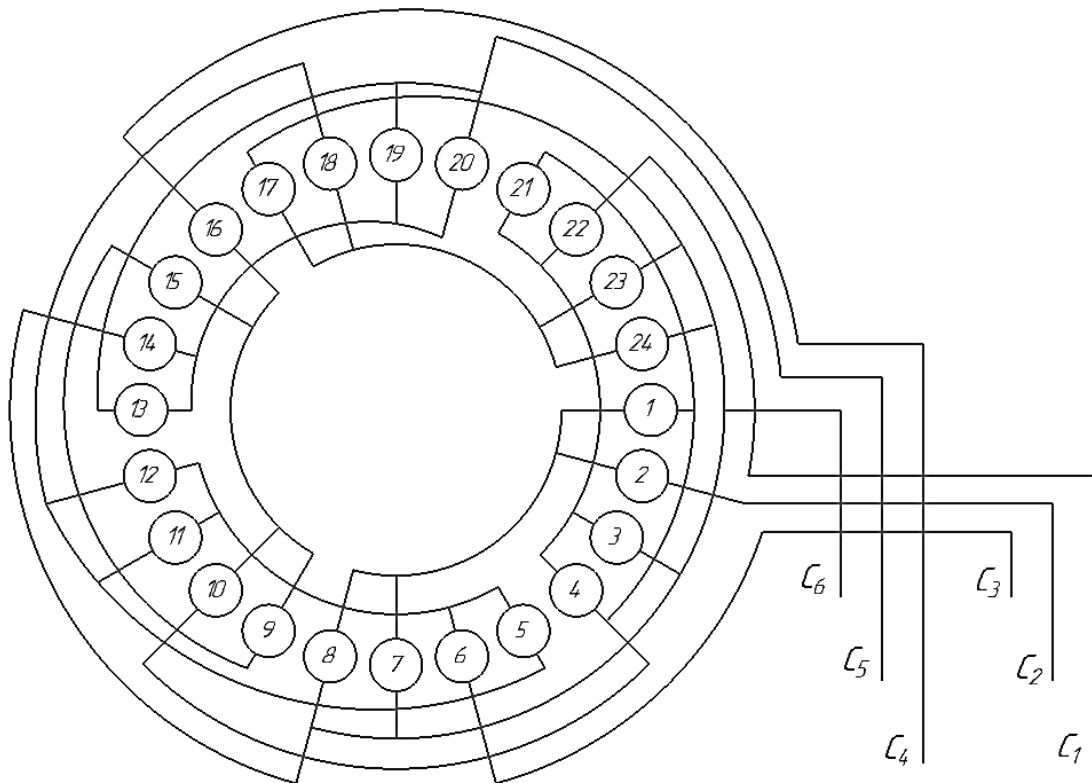


Рисунок 3.12 – Спосіб зображення обмоток у вигляді кругової схеми (трифазна одношарова концентрична обмотка при $Z = 24$, $2p = 4$)

У схемах-розгорнутках двошарових обмоток сторони котушок (секцій), що лежать ближче до повітряного зазору, тобто у верхньому шарі паза, зображують суцільними лініями, а сторони, що лежать у нижньому шарі, – пунктирними. Можна також зустріти зображення активних сторін котушок в обох шарах паза суцільними лініями – у такому разі сторони, що зображені зліва вважаються такими, що лежать у верхньому шарі, а ті, що зображені справа – у нижньому шарі.

Для схем трифазних обмоток дроти різних фаз можуть бути зображені різними типами ліній – суцільними, штриховими і штрихпунктирними; подвійними; різної товщини; різнокольоровими та інше.

Цифрові та буквенні позначення схемах визначають номери пазів, номери секцій та їх сторін, номери та маркування вивідних кінців котушкових груп, фаз обмотки; вказуються напрямки струмів, фазні зони, полюси магнітного поля та інше (Додаток Б).

Огляд схем дозволяє вивчити принцип роботи обмоток, визначити їх властивості та особливості, а також для здійснення обмотувальних робіт.

У рамках курсової роботи необхідно лише вибрати з Додатку Б та викреслити схему обмотки для отриманих при розрахунках даних.

3.3 Розрахунок значення повітряного зазору

Величина повітряного зазору (δ) досить суттєво впливає на енергетичні показники роботи асинхронного двигуна – необхідно прагнути, щоб ця величина була якомога меншою, що призводить до зменшення його магнітного опору та магнітної напруги, і, відповідно, до зменшення МРС магнітного кола та намагнічувального струму двигуна, зростає значення коефіцієнту потужності ($\cos \varphi$) та зменшуються втрати в статорних обмотках. З іншого боку суттєве зменшення повітряного зазору призводить до збільшення поверхневих і пульсаційних втрат, що знижує значення коефіцієнта корисної дії двигуна.

Не існує суворих теоретичних залежностей для визначення величини повітряного зазору, широке застосування мають емпіричні залежності:

1) для двигунів потужністю до 25 кВт:

– при $2p = 2$:

$$\delta = (0,3 + 1,5 \cdot D) \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (3.54)$$

– при $2p \geq 2$:

$$\delta = (0,25 + D) \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (3.55)$$

2) для двигунів потужністю більше 25 кВт:

$$\delta = 0,85 \cdot D \cdot \left(1 + \frac{4,5}{2p}\right) \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (3.56)$$

Повітряний зазор, розрахований за формулами (3.4) – (3.4) заокруглюють:

– при $\delta \leq 0,5$ мм – до 0,05 мм,

– при $\delta > 0,5$ мм – до 0,1 мм.

Наприклад, 0,25 мм, 0,35 мм, 0,45 мм, 0,6 мм, 0,7 мм.

3.4 Розрахунок короткозамкненого ротора

Короткозамкнені обмотки роторів не мають конкретної кількості фаз і полюсів та можуть працювати в електричних машинах, статори яких мають різну кількість полюсів.

У короткозамкнених роторах кожен стрижень короткозамкненої обмотки утворює одну фазу, а загальна кількість фаз дорівнює кількості пазів ротора ($m_2 = Z_2$) і обмотка кожної з фаз має половину витка. Обмотковий коефіцієнт такої обмотки дорівнює одиниці, а умовна кількість пазів на полюс і фазу визначається за залежністю:

$$q_2 = \frac{1}{2Z_2} \quad (3.57)$$

Через взаємодію в повітряному зазорі струмів і полів від вищих гармонік виникають додаткові електромагнітні моменти, що мають негативний вплив на

загальну електромагнітну картину та погіршують форму механічної характеристики двигуна. Через це виокремлюють несприятливі співвідношення значень пазів статора (Z_1) і ротора (Z_2), натомість пропонується використовувати рекомендовані значення числа пазів (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Рекомендовані значення числа пазів короткозамкнених роторів асинхронних двигунів [4]

$2p$	Число пазів статора	Число пазів ротора	
		Пази без скосу	Пази зі скосом
2	12	9, 15	–
	18	11, 12, 15, 21, 22	14, 19, 22, 26, 28, 31, 33, 34, 35
	24	15, 17, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	–
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	12	9	15
	18	10, 14	18, 22
	24	15, 16, 17	16, 18, 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	27, 28, 30, 34, 45, 48
	42	52, 54	34, 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	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, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	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

Продовження таблиці 3.9

10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	87, 93, 94
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163

У двигунах потужністю до 25 кВт рекомендується приймати значення $Z_1 > Z_2$, а для двигунів потужністю більше 25 кВт – $Z_1 < Z_2$, що пояснюється необхідністю «боротьби» з зубцевими гармоніками у повітряному зазорі.

Зовнішній діаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta, \text{ м.} \quad (3.58)$$

Довжина сердечника ротора дорівнює довжині сердечника статора:

$$\ell_2 = \ell_\delta, \text{ м.} \quad (3.59)$$

Зубцевий поділ:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2}, \text{ м.} \quad (3.60)$$

У двигунах з висотою осі обертання до 400 мм найпоширенішими є ротори з литими обмотками, у яких можливе виконання будь-яких необхідних

за розрахунком конфігурацій і розмірних співвідношень стрижнів з урахуванням можливості якісної заливки. Використовують також двоклітинні ротори з литою обмоткою. Вони, як правило, мають фігурні стрижні робочої обмотки і загальні короткозамикаючі кільця.

Осердя роторів асинхронних двигунів при $D_2 < 990$ мм виконують з безпосередньою посадкою на вал без проміжної втулки. Якщо $D_2 > 990$ мм, то сердечник шихтують з окремих сегментів і кріплять або на втулці ротора, або на поздовжніх ребрах, приварених до вала.

При значенні висоти осі обертання $h \leq 250$ мм застосовують гарячу посадку осердь на гладкий вал без шпонки. У двигунах великих розмірів сердечники кріплять на валу за допомогою шпонки.

Внутрішній діаметр осердя ротора в разі безпосередньої посадки на вал дорівнює діаметру вала і може бути визначений:

$$D_g = k_g \cdot D_a, \text{м.} \quad (3.61)$$

Таблиця 3.10 – Коефіцієнт для розрахунку діаметра вала асинхронного двигуна [4]

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

Струм у стрижні короткозамкненого ротора:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i, \text{А.} \quad (3.62)$$

де k_i – коефіцієнт, що враховує вплив струму намагнічування і опору обмоток на відношення струмів у статорі та роторі, і який залежить від значення коефіцієнта навантаження (рис. 3.13).

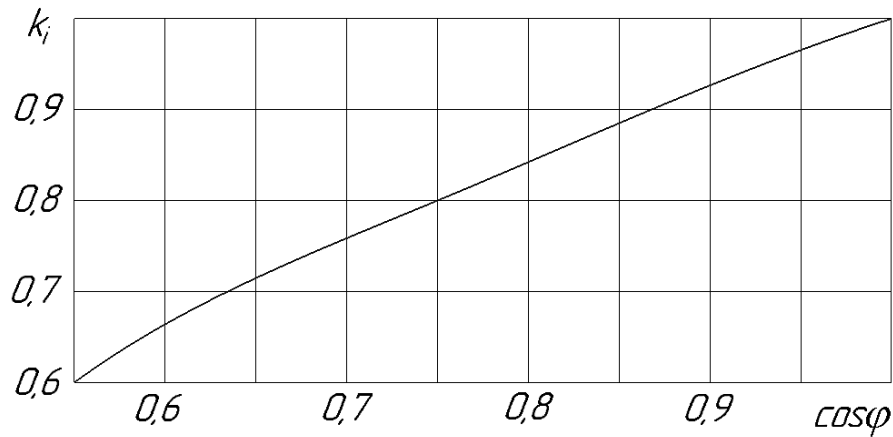


Рисунок 3.13 – Коефіцієнт, що враховує вплив струму намагнічування і опору обмоток на відношення струмів у статорі та роторі [4]

ν_i – коефіцієнт приведення струмів:

$$\nu_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{Z_1}. \quad (3.63)$$

Перетин стрижня:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}, \text{ м}^2, \quad (3.64)$$

де J_2 – щільність струму в стрижнях ротора:

– для «закритих» двигунів з примусовим обдувом зі стрижнів з алюмінію:

$$J_2 = (2,5\text{--}3,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$$

– для двигунів у вибухозахищеному виконанні: $J_2 = (3,0\text{--}4,0) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$,

Для потужних двигунів слід брати менші значення J_2 , а для малопотужних двигунів – більші.

На форму пазів короткозамкнених роторів впливають необхідні форми пускових характеристик двигуна, його потужність та число пар полюсів. У асинхронних двигунах можна зустріти прямокутні, лопаткові, грушоподібні, колбоподібні та трапецієвидні пази.

Зменшення ширини верхньої частини стрижнів та збільшення їх висоти призводять до збільшення пускового моменту, обмежує пускові струми і одночасно призводить до збільшення коефіцієнту магнітної провідності паза та індуктивного опору обмотки ротора, погіршує коефіцієнт потужності за номінального режиму роботи і знижує максимальне значення крутного моменту. Досвід показує, що для забезпечення високих енергетичних показників номінального режиму слід орієнтуватися на використання пазів ротора грушоподібної форми (рис. 3.14).

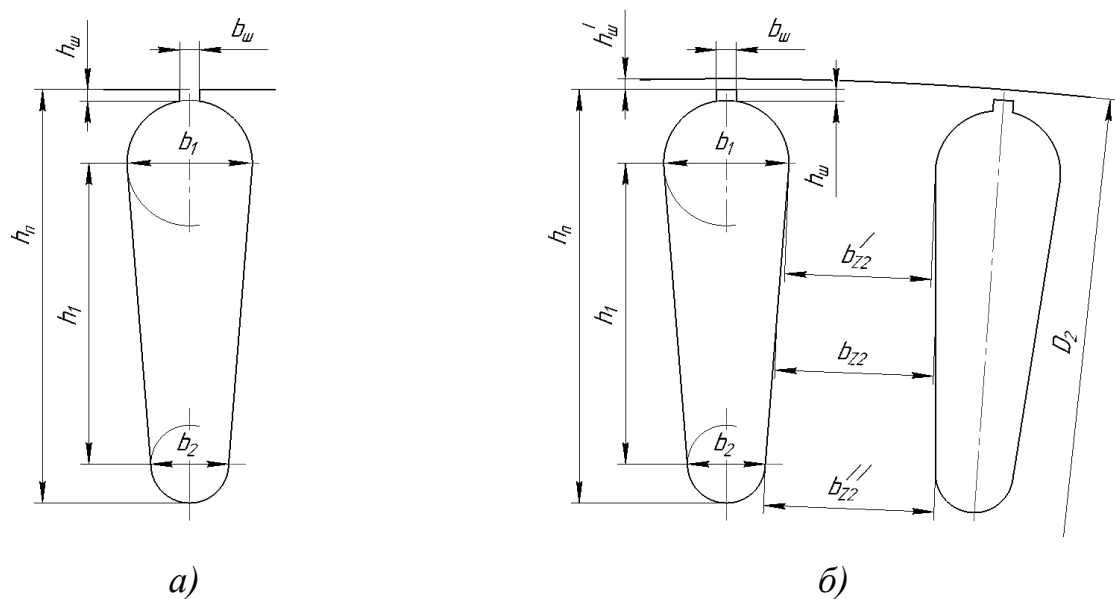


Рисунок 3.14 – Коефіцієнт, що враховує вплив струму намагнічування і опору обмоток на відношення струмів у статорі та роторі

У асинхронних двигунах на форму пазу і його геометричні параметри впливає величина висоти осі. Можуть бути пази з виходом назовні та пази закриті:

1) при $h < 160$ мм – пази виходом назовні ($h'_{w1} = 0,3$ при $2p \geq 4$, $h'_{w1} = 1,0$ – $1,5$ мм при $2p < 4$):

– для $h < 100$ мм: $b_{w1} = 1,0$ мм, $h_{w1} = 0,5$ мм,

– для $100 < h < 130$ мм: $b_{w1} = 1,7$ мм, $h_{w1} = 0,75$ мм.

2) при $160 < h < 250$ мм – закриті пази: $b_{w1} = 1,5$ мм, $h_{w1} = 0,7$ мм.

Ширину зубців ротора можна визначити виходячи зі значення припустимої індукції (B_{Z2}) (табл. 3.4):

$$b_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_2}{B_{Z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c}, \text{ м.} \quad (3.65)$$

Ширина верхньої частини паза:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu}) - Z_2 \cdot b_{Z2}}{\pi + Z_2}, \text{ м.} \quad (3.66)$$

Ширина нижньої частини паза:

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}, \text{ м.} \quad (3.67)$$

Висота пазової частини між верхньою та нижньою шириною паза:

$$h_1 = \frac{Z_2 \cdot \left[\pi \cdot (D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu} - b_2) - Z_2 \cdot (b_{Z2} + b_2) \right]}{2\pi \cdot (\pi + Z_2)}, \text{ м.} \quad (3.68)$$

Повна висота паза ротора:

$$h_{n2} = h_{uu} + h_1 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}, \text{ м.} \quad (3.69)$$

Відстань між сусідніми пазами:

$$b'_{Z2} = \frac{\pi \cdot \left[D_2 - 2(h_{uu} + 2h'_{uu}) - b_1 \right]}{Z_2} - b_1, \text{ м.} \quad (3.70)$$

$$b_{Z2}^{\parallel} = \frac{\pi \cdot [D_2 - 2h_{n2} + b_2]}{Z_2} - b_2, \text{ м.} \quad (3.71)$$

Розрахункова висота зубця:

$$h_{Z2} = h_{n2} - 0,1 \cdot b_2, \text{ м.} \quad (3.72)$$

Уточнена площа стрижня:

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1, \text{ м}^2. \quad (3.73)$$

Уточнена щільність струму в стрижні:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c}, \text{ А/м}^2. \quad (3.74)$$

Струм у короткозамикаючому кільці:

$$I_{\text{кк}} = \frac{I_2}{\Delta} \quad (3.75)$$

де

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} \quad (3.76)$$

Площа поперечного перерізу короткозамикаючих кілець:

$$q_{\text{кк}} = \frac{I_{\text{кк}}}{J_{\text{кк}}} \quad (3.77)$$

де $J_{\text{кк}}$ – щільність струму в короткозамикаючому кільці:

– для «закритих» двигунів з примусовим обдувом зі стрижнів з алюмінію:

$$J_{\text{кк}} = (2,2-3,0) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$$

– для двигунів у вибухозахищеному виконанні: $J_{\text{кк}} = (2,6-3,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Середня висота короткозамикаючого кільця:

$$h_{\text{кк}} = 1,25 \cdot h_{\text{н2}}, \text{ м.} \quad (3.78)$$

Середня ширина короткозамикаючого кільця:

$$b_{\text{кк}} = \frac{q_{\text{кк}}}{h_{\text{кк}}}, \text{ м.} \quad (3.79)$$

Середній діаметр короткозамикаючих кілець:

$$D_{\text{кк сер.}} = D_2 - h_{\text{кк}}, \text{ м.} \quad (3.80)$$

3.5 Розрахунок магнітного кола

Розрахунок магнітного кола здійснюють для режиму холостого ходу двигунів, оскільки у цьому режимі спостерігається відносно високе насичення сталі зубців статора і ротора.

Індукція в зубцях статора і ротора:

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{Z1} \cdot l_{\text{cm1}} \cdot k_c}, \text{ Тл,} \quad (3.81)$$

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{Z2} \cdot l_{\text{cm2}} \cdot k_c}, \text{ Тл.} \quad (3.82)$$

Індукція в ярмі статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_a \cdot l_{\text{cm1}} \cdot k_c}, \text{ Тл.} \quad (3.83)$$

де h'_a – розрахункова висота ярма статора:

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} - \frac{2}{3} d_{\kappa 1} \cdot m_{\kappa 1}, \text{ м.} \quad (3.84)$$

де $d_{\kappa 1}$ – діаметр аксіальних вентиляційних каналів у статорі,

$m_{\kappa 1}$ – кількість рядів аксіальних вентиляційних каналів у статорі, за відсутності каналів $m_{\kappa 1} = 0$.

Індукція в ярмі ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_{cm2} \cdot k_c}, \text{ Тл.} \quad (3.85)$$

де h'_j – розрахункова висота ярма ротора:

– для роторів з посадкою сердечника безпосередньо на вал:

$$h'_j = \frac{2 + p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{\kappa 2} \cdot m_{\kappa 2}, \text{ м.} \quad (3.86)$$

де $d_{\kappa 2}$ – діаметр аксіальних вентиляційних каналів у роторі,

$m_{\kappa 2}$ – кількість рядів аксіальних вентиляційних каналів у роторі, за відсутності каналів $m_{\kappa 2} = 0$.

– для роторів з посадкою сердечника на втулку або на оребрений вал:

$$h'_j = \frac{D_a - D_j}{2} - h_{n2} - \frac{2}{3} d_{\kappa 2} \cdot m_{\kappa 2}, \text{ м.} \quad (3.87)$$

Магнітна напруга в повітряному зазорі:

$$F_\delta = 1,6 \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot 10^6, \text{ А,} \quad (3.88)$$

де k_δ – коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta}, \quad (3.89)$$

де γ – коефіцієнт, що визначається за залежністю:

$$\gamma = \frac{(b_{u1} / \delta)^2}{5 + b_{u1} / \delta}, \quad (3.90)$$

Магнітна напруга зубцевої зони статора:

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_Z \cdot H_{Z1}, \text{ A.} \quad (3.91)$$

Магнітна напруга зубцевої зони ротора:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2}, \text{ A.} \quad (3.92)$$

Відповідні значення H визначають за кривою намагнічування для зубців для прийнятої марки сталі, що представлено у табл. 3.6 – 3.7.

Коефіцієнт насичення зубцевої зони:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta}. \quad (3.93)$$

Якщо $k_Z > 1,5$ – $1,6$, має місце надмірне насичення зубцевої зони, якщо $k_Z < 1,2$, то зубцева зона використовується недостатньо або повітряний зазор є занадто великим. В обох випадках необхідно здійснити коригування.

Магнітна напруга ярма статора:

$$F_a = L_a \cdot H_a, \text{ A.} \quad (3.94)$$

де L_a – довжина середньої магнітної лінії потоку ярма статора:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2p}, \text{ м.} \quad (3.95)$$

H_a – напруженість поля при індукції B_a , визначається за табл. 3.11 – 3.14.

Таблиця 3.11 – Напруженість поля для ярма асинхронних двигунів
(Сталь 2013) [4]

B , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	618	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблиця 3.12 – Напруженість поля для зубців асинхронних двигунів
(Сталь 2013) [4]

B , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696

Продовження таблиці 3.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Таблиця 3.13 – Напруженість поля для ярма асинхронних двигунів
(Сталь 2312) [4]

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Таблиця 3.14 – Напруженість поля для зубців асинхронних двигунів
(Сталь 2312) [4]

$B, Tл$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	150	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200
2,1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17800	18500	19100	19600	20300	21100	22000
2,3	23100	24300	25200	26800	28100	29500	30900	32400	33900	36400

Магнітна напруга ярма ротора:

$$F_j = L_j \cdot H_j, A. \quad (3.96)$$

де L_j – довжина середньої магнітної лінії потоку ярма ротора:

– при $2p = 2$ і безпосередньому насадженні осердя ротора на вал:

$$L_j = 2 \cdot h_j, м. \quad (3.97)$$

де h_j – висота спинки ротора:

$$h_j = \frac{D_2 + D_j}{2} - h_{n2}, \text{м.} \quad (3.98)$$

– для решти випадків:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_\delta + h_j)}{2p}, \text{м.} \quad (3.99)$$

H_j – напруженість поля при індукції B_j , визначається за табл. 3.11 – 3.14.

Сумарна магнітна напруга магнітного кола машини (на пару полюсів):

$$F_{\text{сум}} = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j, \text{А.} \quad (3.100)$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга:

$$k_\mu = \frac{F_{\text{сум}}}{F_\delta}. \quad (3.101)$$

Струм намагнічування у іменованих одиницях:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_{\text{сум}}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{o61}}, \text{А.} \quad (3.102)$$

Струм намагнічування у долях від номінального значення:

$$I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_{1H}}. \quad (3.103)$$

3.6 Розрахунок параметрів номінального режиму роботи двигуна

До параметрів асинхронного двигуна відносять активні та індуктивні опори обмоток статора (r_1, x_1), ротора (r_2, x_2), опір взаємної індуктивності (x_{12}) і розрахунковий опір, який враховує вплив втрат у сталі статора на характеристики двигуна (r_{12}). Усі ці параметри входять до складу схеми заміщення фази асинхронної машини (рис. 3.15).

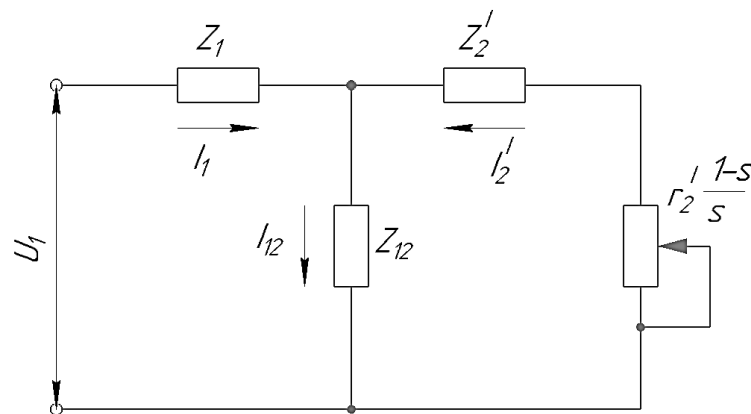


Рисунок 3.15 – Схема заміщення фази обмотки приведеної асинхронної машини

Значення активного опору статора:

$$r_1 = \frac{L}{q_{ef} \cdot a} \cdot k_r \cdot \rho_g, \text{ Ом}, \quad (3.104)$$

де L – загальна довжина ефективних провідників фази обмотки:

$$L = l_{сер.} \cdot w_1, \text{ м}, \quad (3.105)$$

де $l_{сер.}$ – середня довжина витка обмотки, яка дорівнює сумі прямолінійних пазових та вигнутих лобових частин котушки (рис. 3.16):

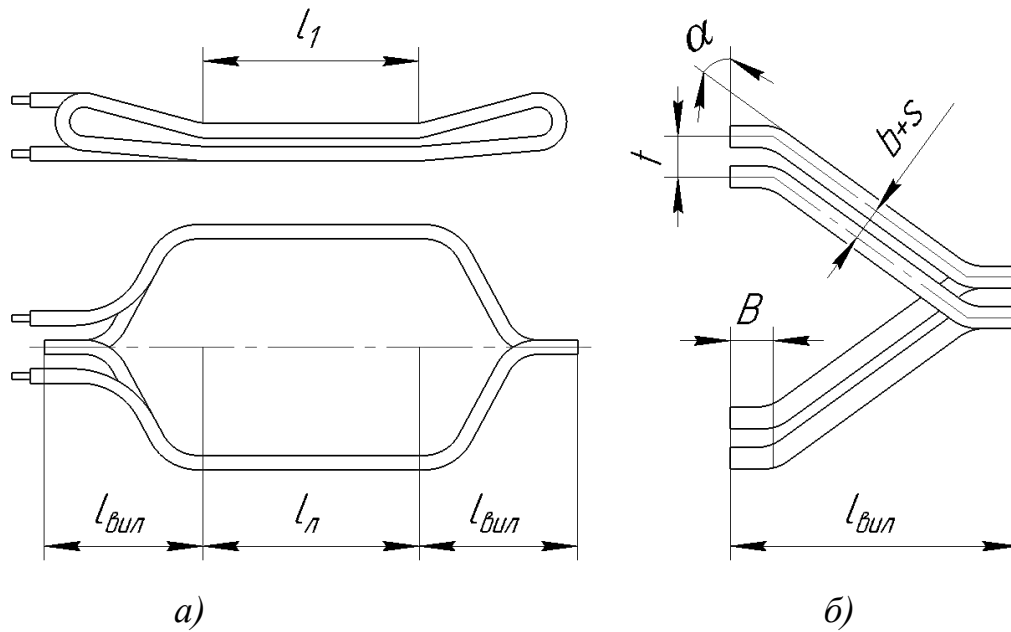


Рисунок 3.16 – Котушка двошарової обмотки статора: а) загальний вигляд, б) розміри лобової частини котушки

$$l_{сер.} = 2 \cdot (l_n + l_{л.}), \text{м}, \quad (3.106)$$

де l_n – довжина пазової частини, яка дорівнює конструктивній довжині осердя машини:

$$l_n = l_1, \text{м}, \quad (3.107)$$

$l_{л.}$ – довжина лобової частини:

$$l_{л.} = k_{л.} \cdot b_{сер.} + 2 \cdot B, \text{м}, \quad (3.108)$$

де $k_{л.}$ – коефіцієнт видовження для лобової частини за табл. 3.15.

$b_{сер.}$ – середня ширина котушки:

$$b_{сер.} = \frac{\pi \cdot \beta_1 \cdot (D + h_{n1})}{2p}, \text{м}. \quad (3.109)$$

де β_1 – відносне укорочення кроку обмотки статора (для одношарових обмоток $\beta_1 = 1$),

B – довжина вильоту прямолінійної частини котушок із паза від торця осердя до початку відгину лобової частини (рис. 3.17): $B = 10 \cdot 10^{-3}$ м.

$l_{вил.}$ – виліт лобових частин обмоток:

$$l_{вил.} = k_{вил.} \cdot b_{сер.} + B, \text{ м}, \quad (3.110)$$

де $k_{вил.}$ – коефіцієнт видовження для вильоту за табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Коефіцієнти видовження лобової частини і вильоту [5]

$2p$	Котушки статора			
	Лобові частини не ізолювані		Лобові частини ізолювані стрічкою	
	k_l	$k_{вил}$	k_l	$k_{вил}$
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
≥ 8	1,50	0,50	1,90	0,72

w_1 – число витків фази,

$q_{эф.}$ – перетин ефективного провідника:

$$q_{эф.} = q_{ел.} \cdot n_{ел.}, \text{ м}^2, \quad (3.111)$$

де $q_{ел.}$ – перетин елементарного провідника, м^2 ,

$n_{ел.}$ – число елементарних провідників у одному ефективному,

a – число паралельних гілок обмотки,

k_r – коефіцієнт збільшення активного опору від дії ефекту витіснення струму, $k_r = 1$,

ρ_θ – питомий опір матеріалу обмотки за розрахункової температури (табл. 3.16). В разі, коли задане значення відсутнє у табл. 3.16, необхідне значення розраховується шляхом інтерполяції.

Таблиця 3.16 – Питомі опори матеріалів обмоток, $[(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)/\text{м}] \cdot 10^{-6}$ [5]

t, °C	15	75	100	120	150
Мідь	0,0175	0,0217	0,0235	0,0250	0,0270
Алюміній	0,0357	0,0444	0,0476	0,0508	0,0549
Латунь	0,0645	0,0800	0,0870	0,0909	0,100

Значення активного опору короткозамкненого ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{\text{кк}}}{\Delta^2}, \text{Ом.} \quad (3.112)$$

де r_c – опір стрижня:

$$r_c = \frac{l_c \cdot \rho_c \cdot k_r}{q_c}, \text{Ом.} \quad (3.113)$$

де l_c – повна довжина стрижня, що дорівнює відстані між короткозамикаючими кільцями,

ρ_c – питомий опір матеріалу стрижня при заданій температурі (табл. 3.16), за відсутності даних приймають 75 °C,

k_r – коефіцієнт збільшення активного опору фази обмотки від дії ефекту витіснення струму, який для двигунів є незначним, $k_r = 1$,

q_c – переріз стрижня, м^2 .

$r_{\text{кк}}$ – опір короткозамикаючого кільця:

$$r_{\text{кк}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{кк сер.}} \cdot \rho_c}{Z_2 \cdot q_{\text{кк}}}, \text{Ом.} \quad (3.114)$$

де $D_{\text{кк сер.}}$ – середній діаметр короткозамикаючого кільця:

$$D_{\text{кк сер.}} = D_2 - b_{\text{кк}}, \text{м,} \quad (3.115)$$

де $b_{\text{кк}}$ – ширина короткозамикаючого кільця, м.

ρ_c – питомий опір матеріалу короткозамикаючого кільця при заданій температурі (табл. 3.16), за відсутності даних приймають 75 °C,

$q_{\text{кк}}$ – переріз короткозамикаючого кільця, м².

Значення активного опору короткозамкненого ротора приведенного до витків первинної обмотки:

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2}, \text{Ом.} \quad (3.116)$$

Відносне значення опору ротора:

$$R_2 = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{в.о.} \quad (3.117)$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:

$$x = 0,158 \cdot f \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}' \cdot (\lambda_n + \lambda_l + \lambda_{\partial})}{p \cdot q}, \text{Ом.} \quad (3.118)$$

де l_{δ}' – довжина лобової частини статора:

$$l_{\delta}' = l_1 - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k, \text{м.} \quad (3.119)$$

де n_k – кількість радіальних вентиляційних каналів,

b_k – ширина радіальних вентиляційних каналів, м.

За відсутності каналів: $l_{\delta}' = l_1$.

λ_n – коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора,
 $\lambda_n = 1,15$.

k_k – коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання, $k_k = 2$,

k_{∂} – коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання для обмоток статора, $k_{\partial} = 2,25$.

Відносне значення опору статора:

$$x_1' = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.} \quad (3.120)$$

Індуктивний опір обмотки короткозамкненого ротора:

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta' \cdot (\lambda_n + \lambda_{\text{л}} + \lambda_\partial) \cdot 10^{-6}, \text{ Ом.} \quad (3.121)$$

Відносне значення опору ротора:

$$X_2 = x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}. \quad (3.122)$$

Приведений до числа витків первинної обмотки індуктивний опір розсіювання фази ротора:

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{o\phi 1})^2}{Z_2}, \text{ Ом.} \quad (3.123)$$

Відносне значення опору статора:

$$x_1' = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.} \quad (3.124)$$

Для прийнятої схеми заміщення значення опорів r_{12} і x_{12} визначаються за залежностями:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{осн.ст.}}}{m \cdot I_\mu^2}, \text{ Ом,} \quad (3.125)$$

де $P_{\text{осн.ст.}}$ – основні втрати в сталі (розраховуються у п. 3.8).

$$x_{12} = \frac{U_{1H}}{I_\mu} - x_1, \text{ Ом,} \quad (3.126)$$

3.7 Відносні параметри асинхронного двигуна

Параметри асинхронних двигунів для зручності розрахунків виражають у відносних одиницях. У якості базисного значення приймається номінальна фазна напруга та номінальний фазний струм статора.

Відносні значення опорів статора:

$$\begin{aligned} r_{1*} &= r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.}, \\ x_{1*} &= x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.}, \\ x_{12*} &= x_{12} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.127)$$

Відносні значення опорів ротора:

$$\begin{aligned} r_{2*}' &= r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.}, \\ x_{2*}' &= x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.}, \\ r_{12*}' &= r_{12}' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}}, \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.128)$$

При наявності скосу пазів, що робиться для зменшення впливу вищих гармонік, покращуються віброакустичні характеристики двигунів, але в деякому ступені зменшується ЕРС обмоток. Скої пазів враховують шляхом збільшення індуктивних опорів розсіювання обмоток статора і ротора:

$$\begin{aligned} x_{1\text{ск}} &= x_1 \cdot \sigma_{\text{ск}}, \text{ Ом}, \\ x_{2\text{ск}} &= x_2 \cdot \sigma_{\text{ск}}, \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (3.129)$$

де $\sigma_{\text{ск}}$ – коефіцієнт, що враховує наявність скосу пазів:

$$\sigma_{ск} = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{b_{ск}}{\tau} \right)^2 \cdot \frac{U_{1н}}{I_{\mu} \cdot x_1}, \quad (3.130)$$

де $b_{ск}$ – скіс пазів, м.

Скошені пази виконують у асинхронних двигунах при $h \leq 160$ мм і приймають $b_{ск} = t_2$.

3.8 Втрати в асинхронному двигуні

Втрати в асинхронних двигунах поділяють на:

- втрати в сталі (основні та додаткові),
- електричні,
- вентиляційні,
- механічні,
- додаткові при навантаженні.

Основі втрати в сталі асинхронних двигунах розраховують лише для осердь статора, оскільки втрати в сталі ротора в номінальних режимах є незначними. У пускових режимах електричні втрати в обмотках у багато разів більші за втрати при номінальному режимі.

Основні втрати в сталі статорів асинхронних двигунів:

$$P_{осн.ст.} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{Z1}^2 \cdot m_{z1}), \text{ Вт}, \quad (3.131)$$

де $p_{1,0/50}$ – питомі втрати, які визначають за табл. 3.17,

β – показник степені – визначають за табл. 3.17.

Таблиця 3.17 – Питомі втрати в сталі та значення показника β [5]

Марка сталі	Питомі втрати, $p_{1,0/50}$, Вт/кг	Показник степені, β
2013	2,50	1,50
2312	1,75	1,40

$k_{\partial a}$ і $k_{\partial z}$ – коефіцієнти, що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілу потоку по перерізам ділянок магнітопроводу і технологічних факторів:

– при $P_H \leq 250$ кВт: $k_{\partial a} = 1,6$, $k_{\partial z} = 1,8$,

– при $P_H > 250$ кВт: $k_{\partial a} = 1,4$, $k_{\partial z} = 1,7$,

B_a і B_{z1} – індукція в ярмі та індукція в зубцях статора, Тл,

m_a і m_{z1} – маса сталі ярма і зубців статора:

$$\begin{aligned} m_a &= \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c, \text{ кг}, \\ m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1cep} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c, \text{ кг}. \end{aligned} \quad (3.132)$$

де h_a – висота ярма статора:

$$h_a = 0,5 \cdot (D_a - D) - h_{n1}, \text{ м}, \quad (3.133)$$

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

b_{z1cep} – середня ширина зубця статора:

$$b_{z1cep} = \frac{b'_{z1} + b''_{z1}}{2}, \text{ м}. \quad (3.134)$$

γ_c – питома маса сталі, $\gamma_c = 7800$ кг/м³.

Додаткові втрати в сталі, що виникають при холостому ході, поділяють на:

– поверхневі втрати в поверхневому шарі коронок зубців статора і ротора (від пульсації індукції в повітряному зазорі),

– пульсаційні втрати в сталі зубців (від пульсації індукції в зубцях).

Амплітуда пульсації індукції в повітряному зазорі над коронами зубців статора і ротора:

$$B_{01(02)} = \beta_{01(02)} \cdot k_\delta \cdot B_\delta, \text{ Тл}, \quad (3.135)$$

де $\beta_{01(02)}$ – коефіцієнт, який для зубців статора залежить від відношення ширини шлицю пазів ротора до величини повітряного зазору, для зубців ротора – від відношення ширини шлиця пазів статора до величини повітряного зазору: $\beta_{01(02)} = 0,35$.

Питомі поверхневі втрати, що припадають на 1 м² поверхні головок зубців:

– статора:

$$p_{нов1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10^4} \right)^{1,5} \cdot B_{01}^2 \cdot t_2^2 \cdot 10^6, \text{Вт}, \quad (3.136)$$

де $k_{01(02)}$ – коефіцієнт, що враховує вплив обробки поверхні головок зубців статора (ротора) на питомі втрати:

– при не обробленій поверхні: $k_{01(02)} = 1,4\text{--}1,8$,

– при обробленій поверхні: $k_{01(02)} = 1,7\text{--}2,0$.

n – частота обертання двигуна, об./хв.

– ротора:

$$p_{нов2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10^4} \right)^{1,5} \cdot B_{02}^2 \cdot t_1^2 \cdot 10^6, \text{Вт}. \quad (3.137)$$

Повні поверхневі втрати статора:

$$P_{нов1} = p_{нов1} \cdot (t_1 - b_{u1}) \cdot Z_1 \cdot l_{cm1}, \text{Вт}. \quad (3.138)$$

Повні поверхневі втрати ротора:

$$P_{нов2} = p_{нов2} \cdot (t_2 - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_{cm2}, \text{Вт}. \quad (3.139)$$

Пульсаційні втрати в зубцях статора:

$$P_{\text{нул1}} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n \cdot B_{\text{нул1}}}{1000} \right)^2 \cdot m_{Z1}, \text{Вт}, \quad (3.140)$$

де $B_{\text{нул1}}$ – амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубців статора:

$$B_{\text{нул1}} = \frac{2,5 \cdot \delta \cdot B_{Z1}}{t_1}, \text{Тл}. \quad (3.141)$$

Аналогічно розраховуємо пульсаційні втрати в зубцях ротора:

$$P_{\text{нул2}} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n \cdot B_{\text{нул2}}}{1000} \right)^2 \cdot m_{Z2}, \text{Вт}, \quad (3.142)$$

де $B_{\text{нул2}}$ – амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубців ротора:

$$B_{\text{нул2}} = \frac{2,5 \cdot \delta \cdot B_{Z2}}{t_2}, \text{Тл}. \quad (3.143)$$

m_{Z2} – маса сталі зубців ротора:

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{Z2} \cdot b_{Z2} \cdot l_{\text{см2}} \cdot k_c \cdot \gamma_c, \text{кг}. \quad (3.144)$$

Загальне значення додаткових втрат у сталі:

$$P_{\text{дод.ст.}} = P_{\text{нов1}} + P_{\text{нул1}} + P_{\text{нов2}} + P_{\text{нул2}}, \text{Вт}. \quad (3.145)$$

Загальні втрати у сталі асинхронних двигунів:

$$P_{\text{ст.}} = P_{\text{осн.ст.}} + P_{\text{дод.ст.}}, \text{Вт}. \quad (3.146)$$

Втрати на тертя в підшипниках та вентиляційні втрати з самообдувом:

$$P_{\text{мех}} = k_m \cdot D^3 \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot 10^3, \text{Вт}, \quad (3.147)$$

де k_m – коефіцієнт, що залежить від числа пар полюсів та геометричних розмірів:

- для двигунів з $D_a \leq 250$ мм: при $2p = 2 - k_m = 5$, при $2p \geq 4 - k_m = 6$,
- для двигунів з $D_a > 250$ мм: при $2p = 2 - k_m = 6$, при $2p \geq 4 - k_m = 7$

Втрати на тертя в підшипниках та вентиляційні втрати у двигунах із зовнішнім обдувом:

$$P_{\text{мех}} = k_m \cdot D_a^4 \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2, \text{Вт}, \quad (3.148)$$

де k_m – коефіцієнт, що визначається: при $2p = 2 - k_m = 1$, при $2p \geq 4 - k_m = 1,3 \cdot (1 - D_a)$,

Втрати на тертя в підшипниках та вентиляційні втрати у двигунах з радіальною системою вентиляції середньої і великої потужності:

$$P_{\text{мех}} = 1,2 \cdot 2p \cdot \tau^3 \cdot (n_k + 11) \cdot 10^3, \text{Вт}. \quad (3.149)$$

де n_k – число радіальних вентиляційних каналів, при їх відсутності – $n = 0$.

Втрати на тертя в підшипниках та вентиляційні втрати у двигунах з аксіальною системою вентиляції:

$$P_{\text{мех}} = k_m \cdot D_{\text{вент}}^3 \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot 10^3, \text{Вт}, \quad (3.150)$$

де k_m – коефіцієнт, що визначається: при $D_a \leq 250$ мм – $k_m = 2,9$, при $D_a > 250$ мм: $k_m = 3,6$.

$D_{\text{вент}}$ – зовнішній діаметр вентилятора, можна приймати $D_{\text{вент}} = D_a$.

Втрати на тертя в підшипниках та вентиляційні втрати у потужних двигунах при $250 < D_a < 500$ мм:

$$P_{\text{мех}} = k_m \cdot D_a^3 \cdot 10^3, \text{Вт}, \quad (3.151)$$

де k_m – коефіцієнт, що визначається за табл. 3.18.

Таблиця 3.18 – Коефіцієнт k_m для визначення механічних втрат [5]

$2p$	2	4	6	8	10	12
k_m	3,65	1,50	0,70	0,35	0,20	0,20

При роботі асинхронних двигунів під навантаженням за рахунок дії потоків розсіювання, пульсацій індукції в повітряному зазорі, від наявності поперечних струмів у стрижнях та інших причин виникають додаткові втрати. Ці трати нормуються і не повинні перевищувати $0,5P_{\text{н}}$.

При роботі двигунів у режимах, відмінних від номінального, значення додаткових втрат визначають:

$$P_{\text{дод.Н}} = 0,005 \cdot P_{1\text{Н}}, \text{Вт}. \quad (3.152)$$

Електричні втрати у всіх фазах обмотки статора:

$$P_{\text{ел1}} = 0,1 \cdot m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \text{Вт}. \quad (3.153)$$

Електричні втрати у короткозамкненому роторі:

$$P_{\text{ел2}} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = Z_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot r_2', \text{Вт}. \quad (3.154)$$

Загальні втрати у асинхронному двигуні:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{ст.}} + P_{\text{ел.1}} + P_{\text{ел.2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{дод}}, \text{Вт}. \quad (3.155)$$

Коефіцієнт корисного дії асинхронного двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_{\text{сум}}}{P_1}. \quad (3.156)$$

Струм холостого ходу двигуна:

$$I_{XX} = \sqrt{I_{XXa}^2 + I_{XXp}^2}, \text{ А.} \quad (3.157)$$

де I_{XXa} – активна складова струму холостого ходу:

$$I_{XXa} = \frac{P_{cm} + P_{mex} + P_{el1XX}}{m \cdot U_{1H\phi}}, \text{ А.} \quad (3.158)$$

де P_{el1XX} – електричні втрати в статорі при холостому ході:

$$P_{el1XX} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1, \text{ Вт.} \quad (3.159)$$

I_{XXp} – реактивна складова струму холостого ходу:

$$I_{XXp} = I_{\mu}, \text{ А.} \quad (3.160)$$

Коефіцієнт потужності при холостому ході:

$$\cos \varphi_{XX} = \frac{I_{XXa}}{I_{XX}}. \quad (3.161)$$

3.9 Розрахунок робочих характеристик асинхронного двигуна

Робочими характеристиками асинхронних двигунів вважають залежності P_1 , I_1 , $\cos \varphi$, η , $s = f(P_2)$, $M = f(P_2)$ і $I_2 = f(P_2)$.

Для розрахунку визначених характеристик скористаємось Г-подібною схемою заміщення (рис. 3.17).

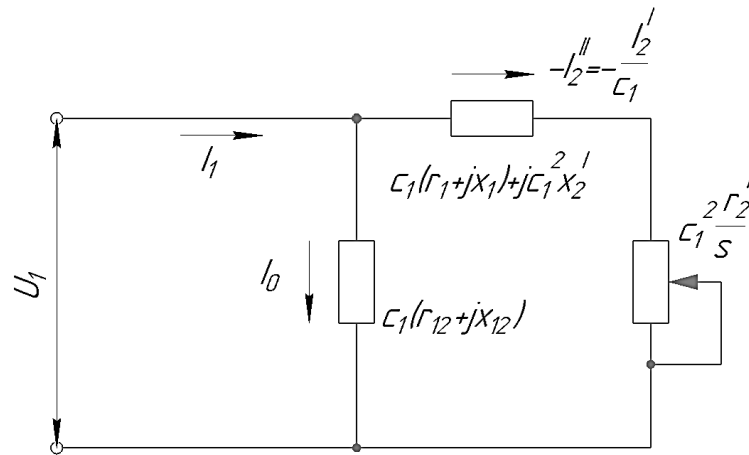


Рисунок 3.17 – Перетворена Г-подібна схема заміщення приведеної асинхронної машини

На даній схемі коефіцієнт c_1 являє собою взятє з протилежним знаком відношення вектора напруги фази U_1 до вектора ЕРС E_1 при синхронному обертанні машини з урахуванням зсуву фаз цих векторів:

$$\bar{c}_1 = 1 + \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{12}} = c_1 \cdot e^{-j\gamma}, \quad (3.162)$$

де

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}}, \quad (3.163)$$

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}. \quad (3.164)$$

Коефіцієнт c_1 можна розкласти на активну і реактивну складові:

Реактивна складова c_{1p} :

$$c_{1p} = \frac{x_1 \cdot r_{12} - r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2}. \quad (3.165)$$

Активна складова c_{1a} :

$$c_{1a} = \sqrt{c_1^2 - c_{1p}^2}. \quad (3.166)$$

Для будови характеристик необхідно задатись рядом значень ковзання у діапазоні від $0,2 \cdot s_n$ до $1,5 \cdot s_n$ (попередньо можна прийняти $s_n = r_{2*}$). Для зручності усі розрахунки краще представити у вигляді таблиці – табл. 3.19.

Додаткові дані для здійснення розрахунків у табл. 3.19:

Активна складова струму синхронного холостого ходу:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{осн.ст.}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1H\phi}}, \text{А.} \quad (3.167)$$

$$I_{0p} = I_{\mu}, \text{А.} \quad (3.168)$$

$$\begin{aligned} a' &= c_{1a}^2 - c_{1p}^2, \\ b' &= 2 \cdot c_{1a} \cdot c_{1p}, \\ a &= c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x_2', \\ b &= c_{1a} \cdot x_1 + c_{1p} \cdot r_1 + a' \cdot x_2', \end{aligned} \quad (3.169)$$

Таблиця 3.19 – Розрахунок характеристик двигуна

№ з/п	Розрахункова формула	Од. вим.	Ковзання				
1	2	3	4	5	...	...	...
1	$\frac{a' \cdot r_2'}{s}$	Ом	0,01	0,02	...	...	...
2	$\frac{b' \cdot r_2'}{s}$	Ом					
3	$R = a + \frac{a' \cdot r_2'}{s}$	Ом					
4	$X = b + \frac{b' \cdot r_2'}{s}$	Ом					
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом					

Продовження таблиці 3.19

1	2	3	4	5	...	...	...
6	$I_2'' = \frac{U_{1H\phi}}{Z}$	A					
7	$\cos \varphi_2' = \frac{R}{Z}$	—					
8	$\sin \varphi_2' = \frac{X}{Z}$	—					
9	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	A					
10	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	A					
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	A					
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	A					
13	$P_1 = 2 \cdot U_{1H\phi} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт					
14	$P_{ел1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт					
15	$P_{ел2} = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт					
16	$P_{доод} = P_{доодH} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right) \cdot 10^{-3}$	кВт					
17	$P_{сум} = P_{ст.} + P_{ел.1} + P_{ел.2} + P_{мех} + P_{доод}$	кВт					
18	$P_2 = P_1 - P_{сум}$	кВт					
19	$\eta = 1 - \frac{P_{сум}}{P_1}$	—					
20	$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}$	—					

Для прийнятих значень ковзання будуються характеристика $s = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$ і уточнюються значення s_n , що відповідає значенню заданої номінальної потужності $P_{2н}$.

3.10 Приклад розрахунку асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Вихідні дані:

Показник	Позначення	Од. вим.	Значення
Номінальна потужність двигуна	$P = P_2$	Вт	2000
Синхронна частота обертання	n_1	об./хв.	3000
Номінальна фазна напруга живлення двигуна	$U_{1H\phi}$	В	380
Число фаз	m	—	3
Частота напруги живлення	f_1	Гц	50
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	—	0,75
ККД	η	—	0,85
Матеріал статора і ротора двигуна	—	—	Сталь 2013
Матеріал статорної обмотки	—	—	мідь
Матеріал роторних стрижнів	—	—	алюміній
Температура обмоток статора	t_{cm}	°C	105
Температура стрижнів ротора	t_p	°C	85

3.10.1 Розрахунок кінематичних і геометричних показників асинхронного двигуна

Розрахунки здійснюємо за формулами (3.1) – (3.169).

Синхронна кутова швидкість вала двигуна:

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ рад/с.}$$

Число полюсів двигуна:

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1.$$

Число пар полюсів $2p = 2$.

За рис. 3.1 обираємо попереднє значення висоти осі обертання двигуна $h_{non} = 88 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

За табл. 3.1 обираємо стандартне значення висоти осі обертання двигуна $h = 90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ і діаметр статора $D_a = 149 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Значення коефіцієнта, що характеризує відношення внутрішнього діаметра осердя статора асинхронного двигуна до зовнішнього діаметра (табл. 3.2): $k_D = 0,55$.

Значення внутрішнього діаметра статора, м:

$$D = 0,55 \cdot 149 \cdot 10^{-3} = 81,95 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Значення коефіцієнта, який визначає відношення ЕРС обмотки статора до значення номінальної напруги за рис. 3.2: $k_E = 0,979$.

Попереднє значення ККД асинхронного двигуна за рис. 3.3: $\eta = 0,83$.
Попереднє значення коефіцієнта потужності: $\cos \varphi = 0,875$.

Розрахункова потужність:

$$P_p = P \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 2000 \cdot \frac{0,979}{0,83 \cdot 0,875} = 2696,04 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт форми поля:

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,111.$$

Значення обмоткового коефіцієнту: $k_{o\delta l} = 0,95$.

Значення електромагнітного навантаження за рис. 3.5: $A = 22 \cdot 10^3$ А/м.

Значення магнітної індукції у повітряному зазорі: $B_\delta = 0,7$ Тл.

Розрахункова довжина повітряного зазору, м:

$$\begin{aligned} \ell_\delta &= \frac{P_p}{D^2 \cdot \Omega \cdot k_B \cdot k_{o\delta l} \cdot A \cdot B_\delta} = \\ &= \frac{2696,04}{(81,95 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 314,16 \cdot 1,111 \cdot 0,95 \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,7} = 78,62 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \end{aligned}$$

Полюсний поділ статора:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 81,95 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,129 \text{ м.}$$

Критерій «правильності»:

$$\lambda = \frac{\ell_\delta}{\tau} = \frac{78,62 \cdot 10^{-3}}{0,129} = 0,609.$$

Отримане значення λ знаходиться у припустимих межах (за рис. 3.7).

Значення повної конструктивної довжини ротора, статора і повітряного зазору рівні між собою: $\ell_1 = \ell_{cm1} = \ell_\delta = 78,62 \cdot 10^{-3}$ м.

3.10.2 Розрахунок статора і обмотки статора

За рис. 3.8 визначаємо мінімальне і максимальне значення зубцевого поділу статора: $t_{1min} = 0,010$ м, $t_{1max} = 0,012$ м.

Можлива кількість пазів статора знаходиться між значеннями:

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1max}} = \frac{\pi \cdot 81,95 \cdot 10^{-3}}{0,012} = 21,45 \approx 21,$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1min}} = \frac{\pi \cdot 81,95 \cdot 10^{-3}}{0,010} = 25,75 \approx 26.$$

Число пазів на полюс та фазу:

$$q_{1min} = \frac{Z_{1min}}{2p \cdot m} = \frac{21}{2 \cdot 3} = 3,5,$$

$$q_{1max} = \frac{Z_{1max}}{2p \cdot m} = \frac{26}{2 \cdot 3} = 4,3.$$

Приймаємо ціле число пазів на полюс і фазу $q = 4$, тоді кінцева кількість пазів $Z_1 = 24$.

Кінцеве значення зубцевого поділу статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 81,95 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 4} = 10,73 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Номінальний струм у статорній обмотці:

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1н\phi} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{2000}{3 \cdot 380 \cdot 0,83 \cdot 0,875} = 2,42 \text{ А.}$$

Попереднє число ефективних провідників у пази:

$$u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1H} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 81,95 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^3}{2,42 \cdot 24} = 97,52.$$

Приймаємо число паралельних гілок у обмотці $a = 1$.

Число ефективних провідників у пазу:

$$u_n = a \cdot u_n' = 1 \cdot 97,52 = 97,52.$$

Отримане число округляємо до найближчого цілого $u_n = 98$.

Число витків у фазі обмотки статора:

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{98 \cdot 24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 392.$$

Остаточне значення лінійного навантаження:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1H} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 2,42 \cdot 392 \cdot 3}{\pi \cdot 81,95 \cdot 10^{-3}} = 22108 \text{ А/м.}$$

Отримане значення лінійного навантаження порівнюємо з раніше прийнятим значенням – відмінність не повинна перевищувати інженерну похибку (5%):

$$\frac{22108 - 22000}{22108} \cdot 100\% = 0,49 \leq 5\%$$

Розрахункове укорочення двошарових обмоток, виконаних з однією великою катушкою в катушковій групі:

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} = \frac{2}{3} \cdot \frac{4+1}{4} = 0,833$$

Коефіцієнт укорочення:

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \beta = \sin \frac{\pi}{2} \cdot 0,833 = 0,966.$$

Коефіцієнт розподілу:

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2 \cdot q \cdot m}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot 3}}{4 \cdot \sin \frac{\pi}{2 \cdot 4 \cdot 3}} = 0,958.$$

Обмотковий коефіцієнт:

$$k_{o\delta 1} = 0,966 \cdot 0,958 = 0,925.$$

Значення потоку у повітряному зазорі:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1H}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1} \cdot f_1} = \frac{0,979 \cdot 380}{4 \cdot 1,111 \cdot 392 \cdot 0,925 \cdot 50} = 4,62 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Уточнене значення індукції у повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot \ell_{\delta}} = \frac{1 \cdot 4,62 \cdot 10^{-3}}{81,95 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3}} = 0,717 \text{ Тл.}$$

Отримане значення індукції порівнюємо з раніше прийнятим значенням – відмінність не перевищує інженерну похибку (5%):

$$\frac{0,717 - 0,7}{0,7} \cdot 100\% = 2,43\% \leq 5\%.$$

Добуток лінійного навантаження на щільність струму за рис. 3.9:
 $(AJ_1) = 136 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2.$

Щільність струму в обмотці статора:

$$J_1 = \frac{(AJ_1)}{A} = \frac{136 \cdot 10^9}{22108} = 6,15 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2.$$

Перетин ефективних провідників:

$$q_{ef1} = \frac{2,42}{1 \cdot 6,15 \cdot 10^6} = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Діаметр одного ефективного провідника:

$$d_{ef} = 2 \cdot \sqrt{\frac{q_{ef1}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,393 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Для двигуна приймаємо механізоване укладання, що обмежує діаметр ізолюваного дроту на рівні 1,4 мм, а число елементарних провідників приймаємо дорівнюючим $n_{ел} = 1$, тому:

$$q_{ел} \approx \frac{q_{ef1}}{n_{ел.}} = \frac{0,393 \cdot 10^{-6}}{1} = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

За табл. 3.3 приймаємо обмотковий провід ПЕТВ з діаметром елементарних провідників $d_{ел} = 0,71 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $d_{із} = 0,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $q_{ел} = 0,396 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $q_{ef} = q_{ел} \cdot n_{ел} = 0,396 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Уточнюємо щільність струму в обмотці:

$$J = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{ел} \cdot n_{ел}} = \frac{2,42}{1 \cdot 0,396 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 6,11 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2.$$

3.10.3 Розрахунок розмірів зубцевої зони статора

За табл. 3.4 приймаємо припустимі значення індукції на різних ділянках магнітного ланцюга:

– у ярмі статора $B_a = 1,55$ Тл,

– у зубцях статора $B_{Z1} = 1,85$ Тл.

Коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю за табл. 3.5: $k_c = 0,97$.

Висота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{4,62 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,55 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 19,54 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Мінімальна ширина зубця статора:

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot \ell_\delta}{B_{Z1} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,717 \cdot 10,73 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3}}{1,85 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 4,29 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Висота шліца паза $h_{uu} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, ширина шліца пазу (за табл. 3.6) $b_{uu} = 3 \cdot 10^{-3}$ м, кут нахилу граней клинової частини $\beta = 45^\circ$

Розміри паза у штампі, м:

$$\begin{aligned} h_{n1} &= \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{149 \cdot 10^{-3} - 81,95 \cdot 10^{-3}}{2} - 19,54 \cdot 10^{-3} = 13,99 \cdot 10^{-3} \text{ м,} \\ b_1 &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z_1} - b_{Z1} = \frac{\pi \cdot (81,95 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 13,99 \cdot 10^{-3})}{24} - 4,29 \cdot 10^{-3} = 10,1 \cdot 10^{-3} \text{ м,} \\ b_2 &= \frac{\pi \cdot (D \cdot \operatorname{tg} \beta + 2 \cdot h_{uu} \cdot \operatorname{tg} \beta - b_{uu}) - Z_1 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot b_{Z1}}{Z_1 \cdot \operatorname{tg} \beta - \pi} = \\ &= \frac{\pi \cdot (81,95 \cdot 10^{-3} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ - 3 \cdot 10^{-3}) - 24 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ \cdot 4,29 \cdot 10^{-3}}{24 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ - \pi} = 7,11 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \end{aligned}$$

Висота клинової частини паза (при $\beta = 45^\circ$):

$$h_k = \frac{b_2 - b_{uu}}{2} = \frac{7,11 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}}{2} = 2,06 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Висота шліца паза:

$$h_1 = h_{n1} - (h_{uu} + h_k) = 13,99 \cdot 10^{-3} - (0,5 \cdot 10^{-3} + 2,06 \cdot 10^{-3}) = 11,43 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Площа поперечного перерізу паза в штампі:

$$S_n = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1 = \frac{10,1 \cdot 10^{-3} + 7,11 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 11,43 \cdot 10^{-3} = 98,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Припуски на шихтовку і збирання осердь за табл. 3.7:

– по ширині паза: $\Delta b_n = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$

– по висоті паза: $\Delta h_n = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Розміри паза у світлі:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_n = 10,1 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_n = 7,11 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 7,01 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_n = 11,43 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 11,33 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Одностороння товщина ізоляції в пазу(за табл. 3.8): $b_{iz} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Площа прокладок у пазу для одношарової обмотки: $S_{np} = 0.$

Площа корпусної ізоляції:

$$S_{iz} = b_{iz} \cdot (2h_{n1} + b_1 + b_2) = \\ = 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 13,99 \cdot 10^{-3} + 10,1 \cdot 10^{-3} + 7,11 \cdot 10^{-3}) = 15,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

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

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - S_{i3} - S_{np} =$$

$$= \frac{10,0 \cdot 10^{-3} + 7,01 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 11,33 \cdot 10^{-3} - 15,82 \cdot 10^{-6} - 0 = 80,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Для перевірки правильності розміщення обмотки в пазах визначаємо значення коефіцієнта заповнення паза і порівнюємо його з припустимими значеннями $k_3 = 0,7-0,75$:

$$k_3 = \frac{d_{i3}^2 \cdot u_n \cdot n_{el}}{S'_n} = \frac{(0,77 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 98 \cdot 1}{80,54 \cdot 10^{-6}} = 0,72.$$

Ширину зубця і розрахункову висоту паза визначають за формулами у відповідності до обраної форми пазу – для рис. 3.10а:

$$b'_z = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z} - b_1 = \frac{\pi \cdot (81,95 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 13,99 \cdot 10^{-3})}{24} - 10,1 \cdot 10^{-3} = 4,29 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b''_z = \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{n1} - h_1)]}{Z_1} - b_2 =$$

$$= \frac{\pi \cdot [81,95 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (13,99 \cdot 10^{-3} - 11,43 \cdot 10^{-3})]}{24} - 7,11 \cdot 10^{-3} = 4,29 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h_z = h_{n1} = 13,99 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Паз статора з його геометричними розмірами та висипна обмотка з ізоляцією зображено на рис. 3.18.

3.10.4 Конструювання обмотки статора

З Додатку Б обираємо відповідну схему та викреслюємо її (рис. 3.19).

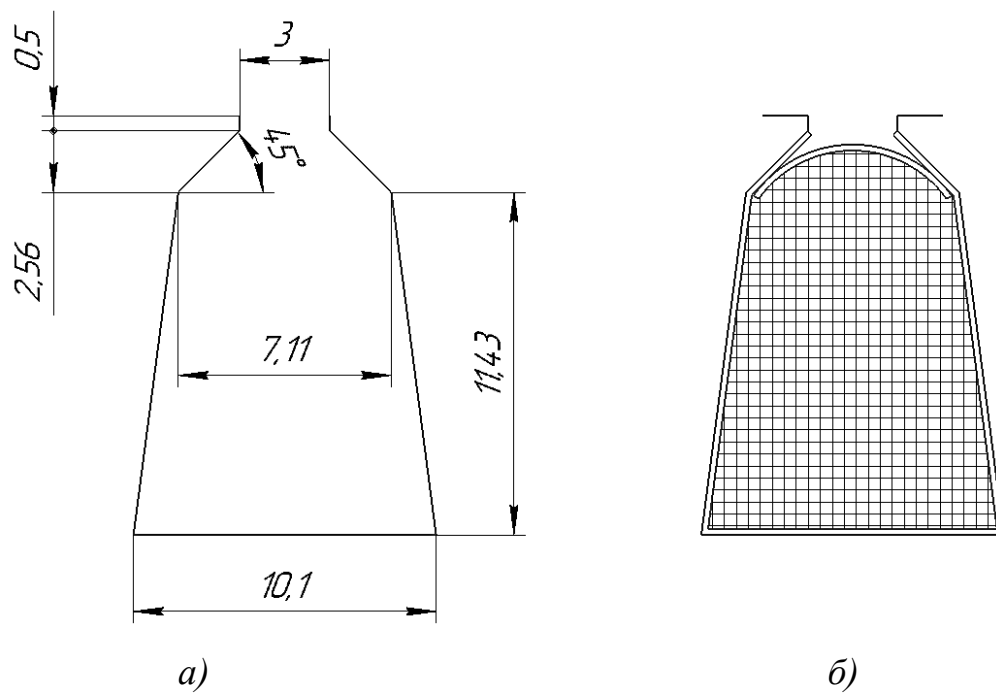


Рисунок 3.18 – Паз статора: а) геометричні розміри, б) всіпна обмотка з ізоляцією

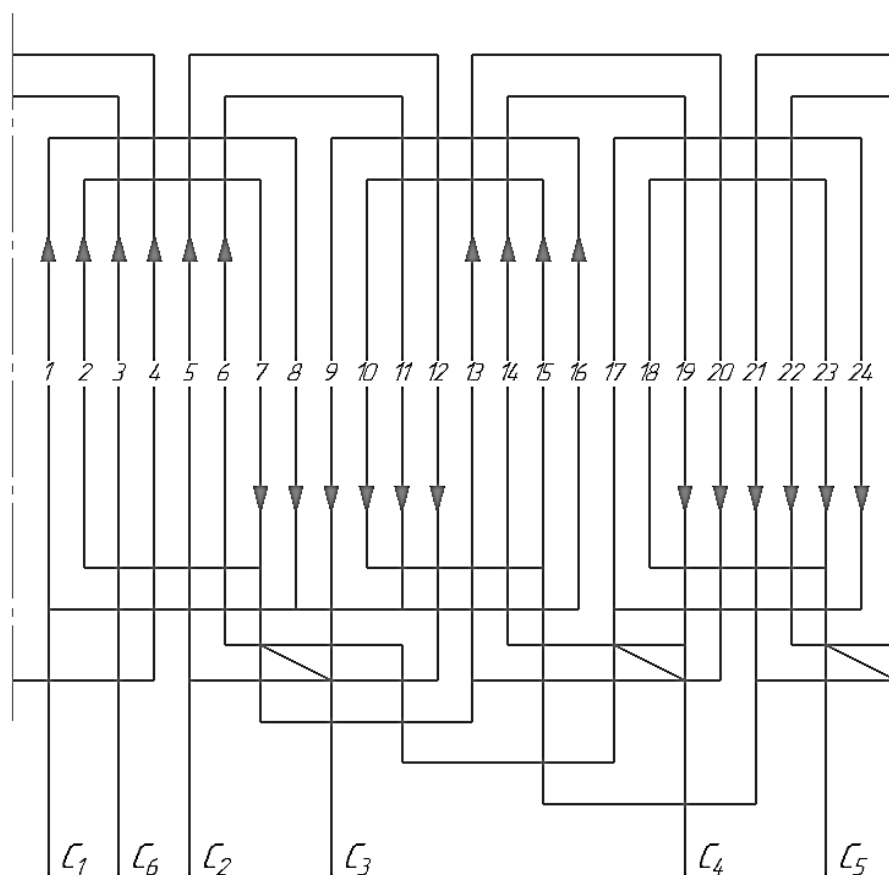


Рисунок 3.19 – Трифазна одношарова концентрична обмотка при $Z = 24$, $2p = 4$

3.10.5 Розрахунок повітряного зазору

Величина повітряного зазору для двигунів потужністю до 25 кВт і при $2p = 2$:

$$\delta = (0,3 + 1,5 \cdot D) \cdot 10^{-3} = (0,3 + 1,5 \cdot 81,95 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-3} = 0,423 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Заокруглюємо розраховане значення повітряного зазору при $\delta \leq 0,5$ мм до значення 0,40 мм.

3.10.6 Розрахунок короткозамкненого ротора

За табл. 3.9 вибираємо число пазів ротора $Z_2 = 18$ (для заданих даних за умови $Z_1 > Z_2$).

Загальна кількість фаз дорівнює кількості пазів ротора $m_2 = Z_2 = 18$ і обмотка кожної з фаз має половину витка.

Обмотковий коефіцієнт такої обмотки дорівнює одиниці.

Умовна кількість пазів на полюс і фазу:

$$q_2 = \frac{1}{2 \cdot Z_2} = \frac{1}{2 \cdot 18} = 0,028.$$

Зовнішній діаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta = D - 2\delta = 81,95 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,40 \cdot 10^{-3} = 81,15 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Довжина сердечника ротора дорівнює довжині сердечника статора:

$$\ell_2 = \ell_\delta = 78,62 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Зубцевий поділ:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 81,15 \cdot 10^{-3}}{18} = 14,16 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Внутрішній діаметр сердечника ротора в разі безпосередньої посадки на вал дорівнює діаметру вала (при значенні коефіцієнта $k_g = 0,23$):

$$D_j = k_g \cdot D_a = 0,23 \cdot 149 \cdot 10^{-3} = 34,27 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Коефіцієнт приведення струмів:

$$\nu_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{ob1}}{Z_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 392 \cdot 0,925}{24} = 90,65.$$

Значення коефіцієнта, що враховує вплив струму намагнічування і опору обмоток на відношення струмів у статорі та роторі, і який залежить від значення коефіцієнта навантаження за рис. 3.11: $k_i = 0,91$.

Попереднє значення струму в стрижні короткозамкненого ротора:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot \nu_i = 0,91 \cdot 2,42 \cdot 90,65 = 199,63 \text{ А.}$$

Приймаємо щільність струму в стрижнях ротора для «закритих» двигунів з примусовим обдувом зі стрижнів з алюмінію: $J_2 = 3,0 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Перетин стрижня:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{199,63}{3 \cdot 10^6} = 66,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Для проектного асинхронного двигуна приймаємо грушоподібні пази з прорізом з виходом назовні: $b_{\text{ш}} = 1,0 \text{ мм}$, $h_{\text{ш}} = 0,5 \text{ мм}$, $h'_{\text{ш}} = 0$ (рис. 3.19).

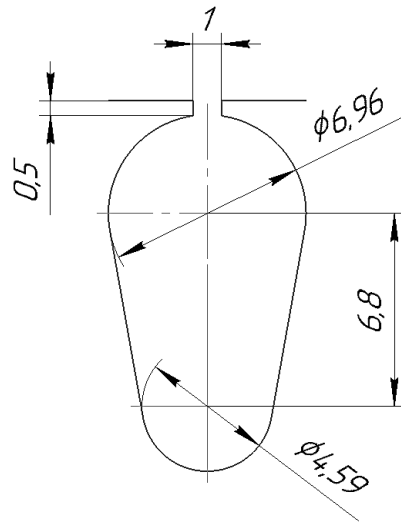


Рисунок 3.19 – Напівзакритий грушовидний паз короткозамкненого ротора

Індукція в пазах короткозамкненого ротора (за табл. 3.4): $B_{Z2} = 1,8$ Тл.

Припустима ширина зубців ротора:

$$b_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_2}{B_{Z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,717 \cdot 14,16 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 5,81 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ширина верхньої частини паза:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu}) - Z_2 \cdot b_{Z2}}{\pi + Z_2} =$$

$$= \frac{\pi \cdot (81,15 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0) - 18 \cdot 5,81 \cdot 10^{-3}}{\pi + 18} = 6,96 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ширина нижньої частини паза:

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{(6,96 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \left(\frac{18}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 66,54 \cdot 10^{-6}}{\frac{18}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 4,59 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Висота пазової частини між верхньою та нижньою шириною паза:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{Z_2 \cdot \left[\pi \cdot (D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu} - b_2) - Z_2 \cdot (b_{Z2} + b_2) \right]}{2\pi \cdot (\pi + Z_2)} = \\
 &= \frac{18 \cdot \left[\pi \cdot (81,15 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0 - 4,59 \cdot 10^{-3}) - 18 \cdot (5,81 \cdot 10^{-3} + 4,59 \cdot 10^{-3}) \right]}{2\pi \cdot (\pi + 18)} = \\
 &= 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Повна висота паза ротора:

$$h_{n2} = h_{uu} + h_1 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} = 0,5 \cdot 10^{-3} + 6,8 \cdot 10^{-3} + \frac{6,96 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{4,59 \cdot 10^{-3}}{2} = 13,08 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Відстань між сусідніми пазами:

$$\begin{aligned}
 b'_{Z2} &= \frac{\pi \cdot [D_2 - 2 \cdot (h_{uu} + 2h'_{uu}) - b_1]}{Z_2} - b_1 = \\
 &= \frac{\pi \cdot [81,15 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0) - 6,96 \cdot 10^{-3}]}{18} - 6,96 \cdot 10^{-3} = 5,81 \cdot 10^{-3} \text{ м,}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b''_{Z2} &= \frac{\pi \cdot [D_2 - 2h_{n2} + b_2]}{Z_2} - b_2 = \\
 &= \frac{\pi \cdot [81,15 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 13,08 \cdot 10^{-3} + 4,59 \cdot 10^{-3}]}{18} - 4,59 \cdot 10^{-3} = 5,81 \cdot 10^{-3} \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Розрахункова висота зубця:

$$h_{Z2} = h_{n2} - 0,1 \cdot b_2 = 13,08 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 4,59 \cdot 10^{-3} = 12,62 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Уточнена площа стрижня:

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

$$= \frac{\pi}{8} \cdot \left[(6,96 \cdot 10^{-3})^2 + (4,59 \cdot 10^{-3})^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot (6,96 \cdot 10^{-3} + 4,59 \cdot 10^{-3}) \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} = 66,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Щільність струму в стрижні:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{199,63}{66,57 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{18} = 0,3473.$$

Струм у короткозамикаючому кільці:

$$I_{\text{кк}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{199,63}{0,3473} = 574,81 \text{ А.}$$

Щільність струму в короткозамикаючому кільці для «закритих» двигунів з примусовим обдувом зі стрижнів з алюмінію: $J_{\text{кк}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Площа поперечного перерізу короткозамикаючих кілець:

$$q_{\text{кк}} = \frac{I_{\text{кк}}}{J_{\text{кк}}} = \frac{574,81}{2,5 \cdot 10^6} = 229,92 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Середня висота короткозамикаючого кільця:

$$h_{\text{кк}} = 1,25 \cdot h_{n2} = 1,25 \cdot 13,08 \cdot 10^{-3} = 16,35 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Середня ширина короткозамикаючого кільця:

$$b_{KK} = \frac{q_{KK}}{h_{KK}} = \frac{229,92 \cdot 10^{-6}}{16,35 \cdot 10^{-3}} = 14,06 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Середній діаметр короткозамикаючих кілець:

$$D_{KK \text{ сep.}} = D_2 - h_{KK} = 81,15 \cdot 10^{-3} - 16,35 \cdot 10^{-3} = 64,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

3.10.7 Розрахунок магнітного кола

Розрахунок магнітного кола здійснюють для режиму холостого ходу двигунів, оскільки у цьому режимі спостерігається відносно високе насичення сталі зубців статора і ротора.

Індукція в зубцях статора:

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot \ell_{\delta}}{b_{Z1} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,717 \cdot 10,73 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3}}{4,29 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,85 \text{ Тл.}$$

Індукція в зубцях ротора:

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_2}{b_{Z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,717 \cdot 14,6 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3}}{5,81 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,86 \text{ Тл.}$$

Застосовуємо конструкцію статора без аксіальних вентиляційних каналів:

$$d_{kl} = 0, m_{kl} = 0.$$

Розрахункова висота ярма статора:

$$\begin{aligned} h'_a &= \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} - \frac{2}{3} d_{k1} \cdot m_{k1} = \\ &= \frac{149 \cdot 10^{-3} - 81,95 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,99 \cdot 10^{-3} - 0 = 19,54 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \end{aligned}$$

Індукція в ярмі статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{4,62 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 19,54 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,55 \text{ Тл.}$$

$$\gamma = \frac{(b_{u1} / \delta)^2}{5 + b_{u1} / \delta} = \frac{(3 \cdot 10^{-3} / 0,4 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 3 \cdot 10^{-3} / 0,4 \cdot 10^{-3}} = 4,5.$$

Коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = \frac{10,73 \cdot 10^{-3}}{10,73 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}} = 1,2.$$

Застосовуємо конструкцію ротора без аксіальних вентиляційних каналів:

$$d_{\kappa 2} = 0, m_{\kappa 2} = 0.$$

Розрахункова висота ярма ротора (для роторів з посадкою сердечника безпосередньо на вал):

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{\kappa 2} \cdot m_{\kappa 2} = \frac{2+1}{3,2 \cdot 1} \cdot \left(\frac{81,15 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,08 \right) - 0 = 25,78 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Індукція в ярмі ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = \frac{4,62 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 25,78 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,17 \text{ Тл.}$$

Магнітна напруга в повітряному зазорі:

$$F_\delta = 1,6 \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,717 \cdot 1,2 \cdot 10^6 = 550,66 \text{ А.}$$

Для сталі 2013, з якої виготовлено статор і ротор двигуна за табл. 3.11 – 3.14 за значеннями індукції визначаємо відповідні значення $H_{Z1} = 2810$ А/м, $H_{Z2} = 1830$ А/м.

Магнітна напруга зубцевої зони статора:

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_Z \cdot H_{Z1} = 2 \cdot 13,99 \cdot 10^{-3} \cdot 2810 = 78,62 \text{ А.}$$

Магнітна напруга зубцевої зони ротора:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2} = 2 \cdot 12,62 \cdot 10^{-3} \cdot 1830 = 46,19 \text{ А.}$$

Коефіцієнт насичення зубцевої зони:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{78,62 + 46,19}{550,66} = 1,23.$$

Напруженість поля при індукції $B_a = 1,55$ Тл визначаємо за табл. 3.11 – 3.14: $H_a = 630$ А/м.

Довжина середньої магнітної лінії потоку ярма статора:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2p} = \frac{\pi \cdot (149 \cdot 10^{-3} - 19,54 \cdot 10^{-3})}{2} = 203,36 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Магнітна напруга ярма статора:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 203,36 \cdot 10^{-3} \cdot 630 = 128,12 \text{ А.}$$

Висота спинки ротора:

$$h_j = \frac{D_2 + D_j}{2} - h_{n2} = \frac{81,15 \cdot 10^{-3} + 34,27 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,08 \cdot 10^{-3} = 44,63 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Довжина середньої магнітної лінії потоку ярма ротора (при $2p = 2$ і безпосередньому насадженні осердя ротора на вал):

$$L_j = 2 \cdot h_j = 2 \cdot 44,63 \cdot 10^{-3} = 89,26 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Напруженість поля при індукції $B_j = 1,17$ Тл визначаємо за табл. 3.11 – 3.14: $H_j = 406$ А/м.

Магнітна напруга ярма ротора:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 89,26 \cdot 10^{-3} \cdot 406 = 36,24 \text{ А.}$$

Сумарна магнітна напруга магнітного кола машини (на пару полюсів):

$$F_{\text{сум}} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 550,66 + 78,62 + 46,19 + 128,12 + 36,24 = 839,83 \text{ А.}$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга:

$$k_{\mu} = \frac{839,83}{550,66} = 1,53.$$

Струм намагнічування у іменованих одиницях:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\text{сум}}}{0,9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o61}} = \frac{1 \cdot 839,83}{0,9 \cdot 3 \cdot 392 \cdot 0,925} = 0,858 \text{ А.}$$

Струм намагнічування у долях від номінального значення:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} = \frac{0,858}{2,42} = 0,355.$$

3.10.8 Розрахунок параметрів номінального режиму роботи двигуна

До параметрів асинхронного двигуна відносять активні та індуктивні опори обмоток статора (r_1, x_1), ротора (r_2, x_2), опір взаємної індуктивності (x_{12}) і розрахунковий опір, який враховує вплив втрат у сталі статора на характеристики двигуна (r_{12}). Усі ці параметри входять до складу схеми заміщення фази асинхронної машини (рис. 3.20).

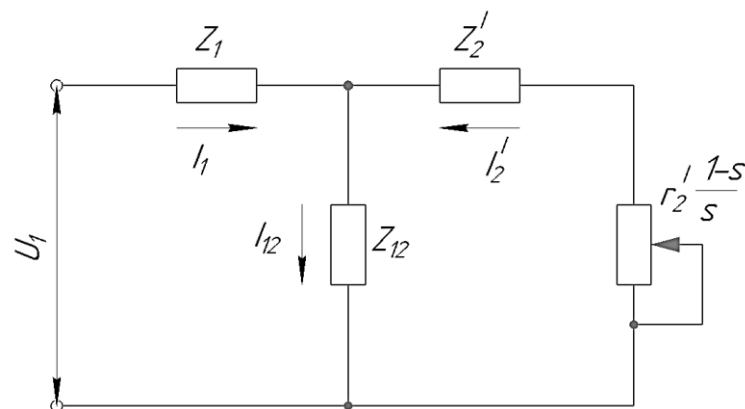


Рисунок 3.20 – Схема заміщення фази обмотки приведеної асинхронної машини

Довжина пазової частини дорівнює конструктивній довжині осердя машини:

$$l_n = l_\delta = 78,62 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Коефіцієнт видовження для лобової частини (для неізольованих лобових частин) за табл. 3.15: $k_l = 1,2$, коефіцієнт вильоту $k_{вл} = 0,26$.

Відносне укорочення кроку обмотки статора: $\beta_1 = 1$.

Середня ширина котушки:

$$b_{сер.} = \frac{\pi \cdot \beta_1 \cdot (D + h_{n1})}{2p} = \frac{\pi \cdot 1 \cdot (81,95 \cdot 10^{-3} + 13,99 \cdot 10^{-3})}{2} = 150,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Довжина вильоту прямолінійної частини котушок з паза від торця осердя до початку відгину лобової частини (рис. 3.17): $B = 10 \cdot 10^{-3}$ м.

Довжина лобової частини:

$$l_{л.} = k_{л.} \cdot b_{сер.} + 2 \cdot B = 1,2 \cdot 150,7 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 200,84 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Виліт лобових частин обмоток:

$$l_{вил.} = k_{вил.} \cdot b_{сер.} + B = 0,26 \cdot 150,7 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3} = 49,18 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Середня довжина витка обмотки, яка дорівнює сумі прямолінійних пазових та вигнутих лобових частин котушки (рис. 3.16):

$$l_{сер.} = 2 \cdot (l_{н.} + l_{л.}) = 2 \cdot (78,62 \cdot 10^{-3} + 200,84 \cdot 10^{-3}) = 558,92 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Загальна довжина ефективних провідників фази обмотки:

$$L = l_{сер.} \cdot w_1 = 558,92 \cdot 10^{-3} \cdot 392 = 219,11 \text{ м.} \quad (3.4)$$

Питомий опір матеріалу статорної обмотки за розрахункової температури обираємо за табл. 3.16: при $t_{1cm} = 100$ °C $\rho_{g1} = 23,53 \cdot 10^{-9}$ (Ом·мм²)/м, при $t_{2cm} = 120$ °C $\rho_{g2} = 25 \cdot 10^{-9}$ (Ом·мм²)/м, при $t_{cm} = 105$ °C:

$$\begin{aligned} \rho_g &= \rho_{g1} + \frac{\rho_{g2} - \rho_{g1}}{t_{2cm} - t_{1cm}} \cdot (t_{cm} - t_{1cm}) = \\ &= 23,53 \cdot 10^{-9} + \frac{25 \cdot 10^{-9} - 23,53 \cdot 10^{-9}}{120 - 100} \cdot (105 - 100) = 23,9 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2 \text{)/м.} \end{aligned}$$

Коефіцієнт збільшення активного опору від дії ефекту витіснення струму, $k_r = 1$.

Перетин ефективного провідника $q_{эф.} = 0,393 \cdot 10^{-6}$ м².

Значення активного опору статора:

$$r_1 = \frac{L}{q_{\text{эф}} \cdot a} \cdot k_r \cdot \rho_g = \frac{219,11}{0,393 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \cdot 1 \cdot 23,9 \cdot 10^{-9} = 13,33 \text{ Ом.}$$

Повна довжина стрижня, що дорівнює відстані між короткозамикаючими кільцями: $l_c = l_{\text{см2}} = 78,62 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Питомий опір алюмінієвих стрижнів за розрахункової температури обираємо за табл. 3.16: при $t_{1p} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{c1} = 44,44 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2\text{)/м}$, при $t_{2p} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{c2} = 47,62 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2\text{)/м}$, при $t_p = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned} \rho_c &= \rho_{c1} + \frac{\rho_{c2} - \rho_{c1}}{t_{2p} - t_{1p}} \cdot (t_p - t_{1p}) = \\ &= 44,44 \cdot 10^{-9} + \frac{47,62 \cdot 10^{-9} - 44,44 \cdot 10^{-9}}{100 - 75} \cdot (85 - 75) = 45,71 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2\text{)/м.} \end{aligned}$$

Переріз стрижня, $q_c = 66,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Опір стрижнів:

$$r_c = \frac{l_c \cdot \rho_c \cdot k_r}{q_c} = \frac{78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 45,71 \cdot 10^{-9} \cdot 1}{66,57 \cdot 10^{-6}} = 53,98 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Середній діаметр короткозамикаючого кільця:

$$D_{\text{кк сер.}} = D_2 - b_{\text{кк}} = 81,15 \cdot 10^{-3} - 14,06 \cdot 10^{-3} = 67,09 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Опір короткозамикаючого кільця:

$$r_{\text{кк}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{кк сер.}} \cdot \rho_c}{Z_2 \cdot q_{\text{кк}}} = \frac{\pi \cdot 67,09 \cdot 10^{-3} \cdot 45,71 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot 229,92 \cdot 10^{-6}} = 2,33 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Значення активного опору короткозамкненого ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{KK}}{A^2} = 53,98 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 2,33 \cdot 10^{-6}}{0,3473^2} = 92,61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Значення активного опору короткозамкненого ротора приведенного до витків первинної обмотки:

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 92,61 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (392 \cdot 0,925)^2}{18} = 8,12 \text{ Ом.}$$

Відносне значення опору ротора:

$$R_2 = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 8,12 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,0517 \text{ в.о.}$$

$$h_1 = h_{n2} - h_{u2} - h_{u2}' + 0,2 \cdot b_{2p} = 13,08 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3} - 0 + 0,2 \cdot 4,59 \cdot 10^{-3} = 13,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Коефіцієнт k_δ для робочого режиму дорівнює $k_\delta = 1$.

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора, $\lambda_n = 1,15$.

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання, $\lambda_k = 2$,

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання для обмоток статора, $\lambda_\delta = 2,25$.

Довжина лобової частини статора: $l'_\delta = l_1 = 78,62 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:

$$\begin{aligned} x_1 &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l'_\delta \cdot (\lambda_n + \lambda_k + \lambda_\delta)}{p \cdot q} = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{392}{100} \right)^2 \cdot \frac{78,62 \cdot 10^{-3} \cdot (1,15 + 2 + 2,25)}{1 \cdot 4} = 12,88 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Відносне значення опору статора:

$$x_1' = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 12,88 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,082 \text{ в.о.}$$

Індуктивний опір обмотки короткозамкненого ротора:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_s' \cdot (\lambda_n + \lambda_r + \lambda_\delta) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot (1,15 + 2 + 2,25) \cdot 10^{-6} = 16,77 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Приведений до числа витків первинної обмотки індуктивний опір розсіювання фази ротора:

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{o\phi 1})^2}{Z_2} = 16,77 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (392 \cdot 0,925)^2}{18} = 14,7 \text{ Ом.}$$

Відносне значення індуктивного опору ротора:

$$X_2 = x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 14,7 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,0936 \text{ в.о.}$$

3.10.9 Втрати в асинхронному двигуні

Втрати в асинхронних двигунах поділяють на:

- втрати в сталі (основні та додаткові),
- електричні,
- вентиляційні,
- механічні,
- додаткові при навантаженні.

Питомі втрати у сталі асинхронних двигунів і показник ступеню (за табл. 3.17): $p_{1,0/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$, $\beta = 1,5$.

Коефіцієнти, що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілу потоку по перерізам ділянок магнітопроводу і технологічних факторів (при $P_H \leq 250$ кВт): $k_{\partial a} = 1,6$, $k_{\partial z} = 1,8$.

Висота ярма статора:

$$h_a = 0,5 \cdot (D_a - D) - h_{n1} = 0,5 \cdot (149 \cdot 10^{-3} - 81,95 \cdot 10^{-3}) - 13,99 \cdot 10^{-3} = 19,54 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розрахункова висота зубця статора: $h_{z1} = h_{n1} = 13,99 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Середня ширина зубця статора:

$$b_{z1cep} = \frac{b'_{z1} + b''_{z1}}{2} = \frac{4,29 \cdot 10^{-3} + 4,29 \cdot 10^{-3}}{2} = 4,29 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Питома маса сталі, $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$.

Маса сталі ярма статора:

$$\begin{aligned} m_a &= \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ &= \pi \cdot (149 \cdot 10^{-3} - 19,54 \cdot 10^{-3}) \cdot 19,54 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7800 = 4,73 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Маса сталі зубців статора:

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1cep} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ &= 13,99 \cdot 10^{-3} \cdot 4,29 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,857 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Основні втрати в сталі статорів асинхронних двигунів:

$$\begin{aligned} P_{осн.ст.} &= p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,55^2 \cdot 4,73 + 1,8 \cdot 1,85^2 \cdot 0,857) = 58,65 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Коефіцієнт, який для зубців статора залежить від відношення ширини шлицю пазів ротора до величини повітряного зазору, для зубців ротора – від відношення ширини шлицю пазів статора до величини повітряного зазору: $\beta_{01(02)} = 0,35$.

Амплітуда пульсації індукції в повітряному зазорі над коронками зубців статора і ротора:

$$B_{01(02)} = \beta_{01(02)} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0,35 \cdot 1,2 \cdot 0,717 = 0,301 \text{ Тл.}$$

Коефіцієнт, що враховує вплив обробки поверхні головок зубців статора (ротора) на питомі втрати (при не обробленій поверхні): $k_{01(02)} = 1,5$.

Питомі поверхневі втрати, що припадають на 1 м² поверхні головок зубців:

– статора:

$$\begin{aligned} p_{нов1} &= 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10^4} \right)^{1,5} \cdot B_{01}^2 \cdot t_2^2 \cdot 10^6 = \\ &= 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{18 \cdot 3000}{10^4} \right)^{1,5} \cdot 0,301^2 \cdot (14,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^6 = 181,76 \text{ Вт,} \end{aligned}$$

– ротора:

$$\begin{aligned} p_{нов2} &= 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10^4} \right)^{1,5} \cdot B_{02}^2 \cdot t_1^2 \cdot 10^6 = \\ &= 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{24 \cdot 3000}{10^4} \right)^{1,5} \cdot 0,301^2 \cdot (10,73 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^6 = 151,14 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Повні поверхневі втрати статора:

$$\begin{aligned} P_{нов1} &= p_{нов1} \cdot (t_1 - b_{u1}) \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} = \\ &= 181,76 \cdot (10,73 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 24 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} = 3,34 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Повні поверхневі втрати ротора:

$$P_{\text{пов}2} = p_{\text{пов}2} \cdot (t_2 - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_{cm2} = \\ = 151,14 \cdot (14,6 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 18 \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} = 2,91 \text{ Вт.}$$

Амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубців статора:

$$B_{\text{нул}1} = \frac{2,5 \cdot \delta \cdot B_{Z1}}{t_1} = \frac{2,5 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,85}{10,73 \cdot 10^{-3}} = 0,172 \text{ Тл.}$$

Пульсаційні втрати в зубцях статора:

$$P_{\text{нул}1} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n \cdot B_{\text{нул}1}}{1000} \right)^2 \cdot m_{Z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{18 \cdot 3000 \cdot 0,172}{1000} \right)^2 \cdot 0,857 = 8,13 \text{ Вт.}$$

Амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубців ротора:

$$B_{\text{нул}2} = \frac{2,5 \cdot \delta \cdot B_{Z2}}{2 \cdot t_2} = \frac{2,5 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,86}{14,6 \cdot 10^{-3}} = 0,127 \text{ Тл.}$$

Маса сталі зубців ротора:

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ = 18 \cdot 12,62 \cdot 10^{-3} \cdot 5,81 \cdot 10^{-3} \cdot 78,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,834 \text{ кг.}$$

Пульсаційні втрати в зубцях ротора:

$$P_{\text{нул}2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n \cdot B_{\text{нул}2}}{1000} \right)^2 \cdot m_{Z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{24 \cdot 3000 \cdot 0,127}{1000} \right)^2 \cdot 0,834 = 7,67 \text{ Вт.}$$

Загальне значення додаткових втрат у сталі:

$$P_{\text{дод.ст.}} = P_{\text{нов1}} + P_{\text{нул1}} + P_{\text{нов2}} + P_{\text{нул2}} = 3,34 + 8,13 + 2,91 + 7,67 = 22,05 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати у сталі асинхронних двигунів:

$$P_{\text{ст.}} = P_{\text{осн.ст.}} + P_{\text{дод.ст.}} = 58,65 + 22,05 = 80,7 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт, що залежить від числа пар полюсів та геометричних розмірів (для двигунів з $D_a \leq 250$ мм, при $2p = 2$) $k_m = 5$.

Втрати на тертя в підшипниках та вентиляційні втрати з самообдувом:

$$P_{\text{мех}} = k_m \cdot D^3 \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 5 \cdot (81,95 \cdot 10^{-3})^3 \cdot \left(\frac{3000}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 24,77 \text{ Вт.}$$

Значення додаткових втрат:

$$P_{\text{дод.Н}} = 0,005 \cdot P_{1H} = 0,005 \cdot 2000 = 10 \text{ Вт.}$$

Електричні втрати в статорі при холостому ході:

$$P_{\text{елXX}} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 0,858^2 \cdot 13,33 = 29,44 \text{ Вт.}$$

Активна складова струму холостого ходу:

$$I_{\text{XXa}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{елXX}}}{m \cdot U_{1H\phi}} = \frac{80,7 + 24,77 + 29,44}{3 \cdot 380} = 0,118 \text{ А.}$$

Реактивна складова струму холостого ходу:

$$I_{\text{XXp}} = I_{\mu} = 0,858 \text{ А.}$$

Струм холостого ходу двигуна:

$$I_{XX} = \sqrt{I_{XXa}^2 + I_{XXp}^2} = \sqrt{0,118^2 + 0,858^2} = 0,866 \text{ А.}$$

Коефіцієнт потужності при холостому ході:

$$\cos \varphi_{XX} = \frac{I_{XXa}}{I_{XX}} = \frac{0,118}{0,866} = 0,1363.$$

3.10.10 Розрахунок робочих характеристик

Для прийнятої схеми заміщення значення опорів r_{12} і x_{12} визначаються за залежностями:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{осн.ст.}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{58,65}{3 \cdot 0,858^2} = 26,56 \text{ Ом.}$$

$$x_{12} = \frac{U_{1H\phi}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{380}{0,858} - 12,88 = 430,01 \text{ Ом.}$$

Відносні значення опорів статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 13,33 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,0849 \text{ в.о.,}$$

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 12,88 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,082 \text{ в.о.,}$$

$$x_{12*} = x_{12} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 430,01 \cdot \frac{2,42}{380} = 2,74 \text{ в.о.}$$

Відносні значення опорів ротора:

$$r_{2*}' = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 8,12 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,0517 \text{ в.о.},$$

$$x_{2*}' = x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 14,7 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,0936 \text{ в.о.},$$

$$r_{12*}' = r_{12}' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H\phi}} = 26,56 \cdot \frac{2,42}{380} = 0,169 \text{ в.о.}$$

У асинхронних двигунах при $h \leq 160$ мм використовуються скошені пази зі скосом $b_{\text{ск}} = t_2 = 14,6 \cdot 10^{-3}$ м.

Коефіцієнт, що враховує наявність скосу пазів:

$$\sigma_{\text{ск}} = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{b_{\text{ск}}}{\tau} \right)^2 \cdot \frac{U_{1H\phi}}{I_{\mu} \cdot x_1} = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{14,6 \cdot 10^{-3}}{0,129} \right)^2 \cdot \frac{380}{0,858 \cdot 12,88} = 1,18.$$

Скіс пазів враховують шляхом збільшення індуктивних опорів розсіювання обмоток статора і ротора:

$$x_{1\text{ск}} = x_1 \cdot \sigma_{\text{ск}} = 12,88 \cdot 1,18 = 15,2 \text{ Ом},$$

$$x_{2\text{ск}} = x_2 \cdot \sigma_{\text{ск}} = 16,77 \cdot 10^{-5} \cdot 1,18 = 19,79 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Робочими характеристиками асинхронних двигунів вважають залежності $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, s = f(P_2), M = f(P_2)$ і $I_2 = f(P_2)$.

Для розрахунку визначених характеристик скористаємось Г-подібною схемою заміщення (рис. 3.21).

На даній схемі коефіцієнт c_1 являє собою взате з протилежним знаком відношення вектора напруги фази U_1 до вектора ЕРС E_1 :

$$\bar{c}_1 = c_1 \cdot e^{-j\gamma},$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_{1CK}}{x_{12}} = 1 + \frac{15,2}{430,01} = 1,035,$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_{1CK}}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_{1CK} + x_{12})} = \\ &= \arctg \frac{13,33 \cdot 430,01 - 26,56 \cdot 15,2}{26,56 \cdot (13,33 + 26,56) + 430,01 \cdot (15,2 + 430,01)} = 0,0277, \\ \bar{c}_1 &= 1,035 \cdot e^{-j \cdot 0,0277}. \end{aligned}$$

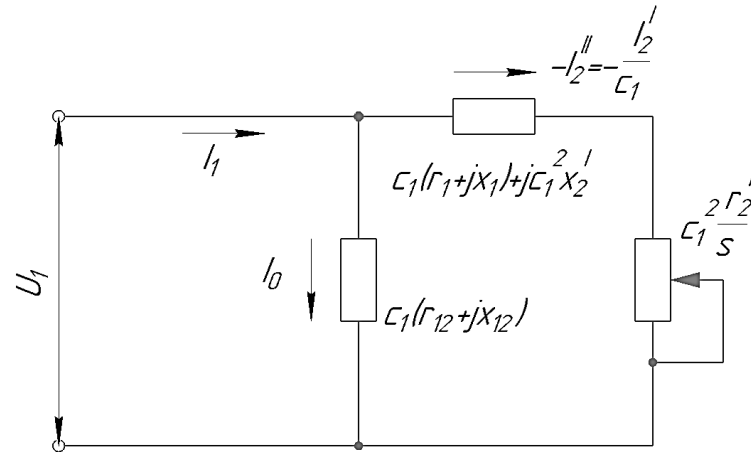


Рисунок 3.21 – Перетворена Г-подібна схема заміщення приведеної асинхронної машини

Коефіцієнт c_1 можна розкласти на активну і реактивну складові.

Реактивна складова c_{1p} :

$$c_{1p} = \frac{x_{1CK} \cdot r_{12} - r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{15,2 \cdot 26,56 - 13,33 \cdot 430,01}{26,56^2 + 430,01^2} = -0,0287.$$

Активна складова c_{1a} :

$$c_{1a} = \sqrt{c_1^2 - c_{1p}^2} = \sqrt{1,035^2 - (-0,0287)^2} = 1,0346.$$

Активна складова струму синхронного холостого ходу:

$$I_{0a} = \frac{P_{оч.см.} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1H\phi}} = \frac{58,65 + 3 \cdot 0,858^2 \cdot 13,33}{3 \cdot 380} = 0,0773 \text{ А.}$$

$$I_{0p} = I_{\mu} = 0,858 \text{ А.}$$

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2 = 1,0346^2 - (-0,0287)^2 = 1,07,$$

$$b' = 2 \cdot c_{1a} \cdot c_{1p} = 2 \cdot 1,0346 \cdot (-0,0287) = -0,0594,$$

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_{1ск} - b' \cdot x_2' = 1,0346 \cdot 13,33 - (-0,02873) \cdot 15,2 - (-0,0594) \cdot 14,7 = 15,1 \text{ Ом,}$$

$$b = c_{1a} \cdot x_{1ск} + c_{1p} \cdot r_1 + a' \cdot x_2' = 1,0346 \cdot 15,2 + (-0,0287) \cdot 13,33 + 1,07 \cdot 14,7 = 31,07 \text{ Ом.}$$

Для будови характеристик задаємось рядом значень ковзання. Для зручності усі розрахунки краще представити у вигляді таблиці – табл. 3.20.

Таблиця 3.20 – Розрахунок характеристик двигуна

№ з/П	Показник	Од. вим.	Ковзання (s)							
			0,01	0,04	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22
1	$(a' \cdot r_2')/s$	Ом	868,8	217,2	124,1	86,9	66,8	54,3	45,7	39,5
2	$(b' \cdot r_2')/s$	Ом	-48,2	-12,1	-6,9	-4,8	-3,7	-3,0	-2,5	-2,2
3	R	Ом	883,9	232,3	139,2	102,0	81,9	69,4	60,8	54,6
4	X	Ом	-17,2	19,0	24,2	26,2	27,4	28,1	28,5	28,9
5	Z	Ом	884,1	233,1	141,3	105,3	86,4	74,9	67,2	61,8
6	I_2''	А	0,430	1,630	2,689	3,608	4,399	5,076	5,656	6,153
7	$\cos \phi_2$	—	1,000	0,997	0,985	0,968	0,949	0,927	0,905	0,884
8	$\sin \phi_2$	—	-0,019	0,082	0,171	0,249	0,317	0,375	0,425	0,468
9	I_{1a}	А	0,507	1,702	2,727	3,572	4,250	4,784	5,198	5,516
10	I_{1p}	А	0,850	0,991	1,318	1,757	2,251	2,760	3,260	3,735
11	I_1	А	0,989	1,970	3,029	3,981	4,809	5,523	6,135	6,662
12	I_2'	А	0,445	1,687	2,783	3,735	4,553	5,254	5,854	6,368
13	P_1	кВт	0,385	1,294	2,072	2,715	3,230	3,635	3,950	4,192
14	$P_{ел1}$	кВт	0,004	0,016	0,037	0,063	0,092	0,122	0,151	0,177
15	$P_{ел2}$	кВт	0,003	0,007	0,019	0,034	0,050	0,067	0,083	0,099
16	$P_{доод}$	кВт	0,004	0,008	0,013	0,016	0,020	0,023	0,025	0,028
17	$P_{сум}$	кВт	0,116	0,136	0,174	0,219	0,268	0,318	0,365	0,409
18	P_2	кВт	0,269	1,158	1,899	2,495	2,962	3,318	3,586	3,783
19	η	—	0,698	0,895	0,916	0,919	0,917	0,913	0,908	0,902
20	$\cos \phi$	—	0,512	0,864	0,900	0,897	0,884	0,866	0,847	0,828

Для прийнятих значень ковзання будуються характеристика $s = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos\varphi = f(P_2)$ і уточнюються значення s_n , що відповідає значенню заданої номінальної потужності P_{2n} .

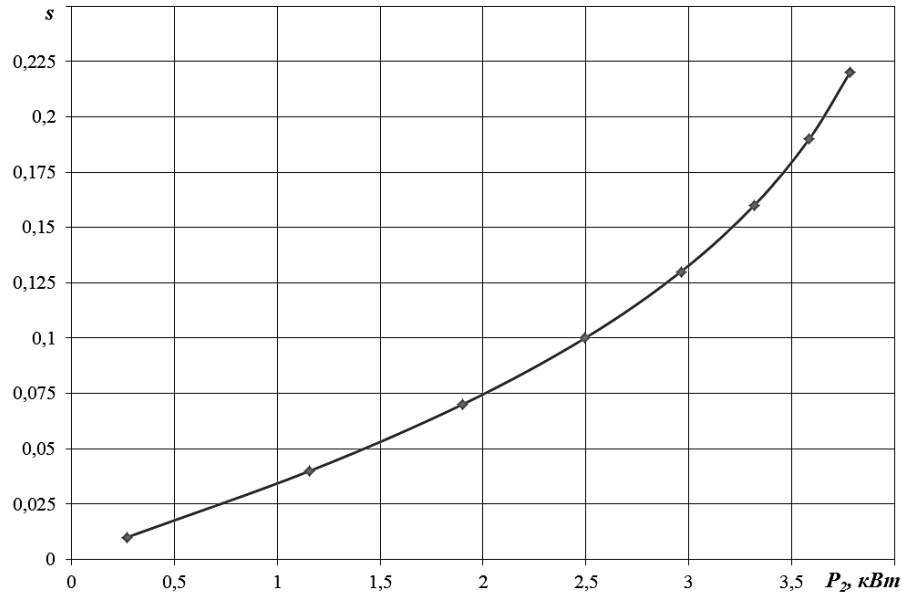


Рисунок 3.22 – Залежність ковзання від потужності на валу двигуна

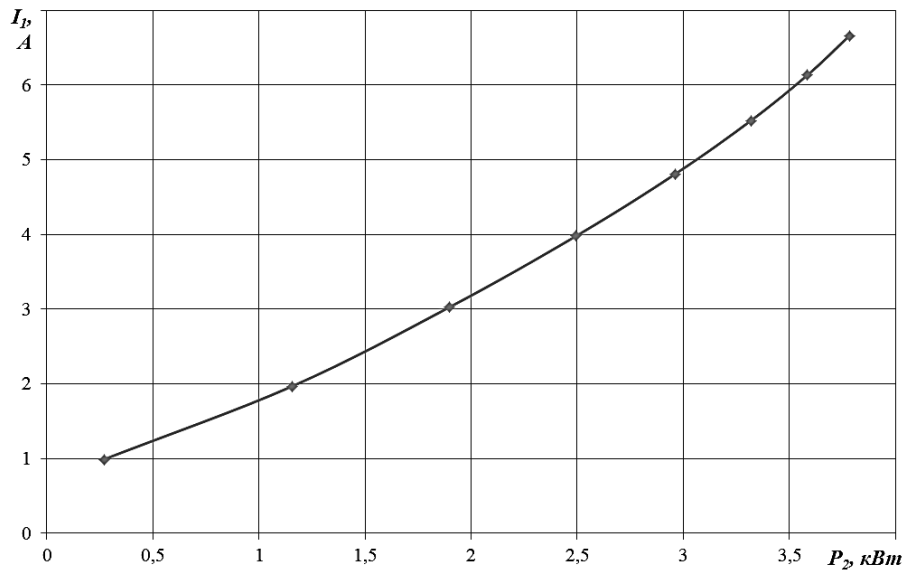


Рисунок 3.23 – Залежність статорного струму від потужності на валу двигуна

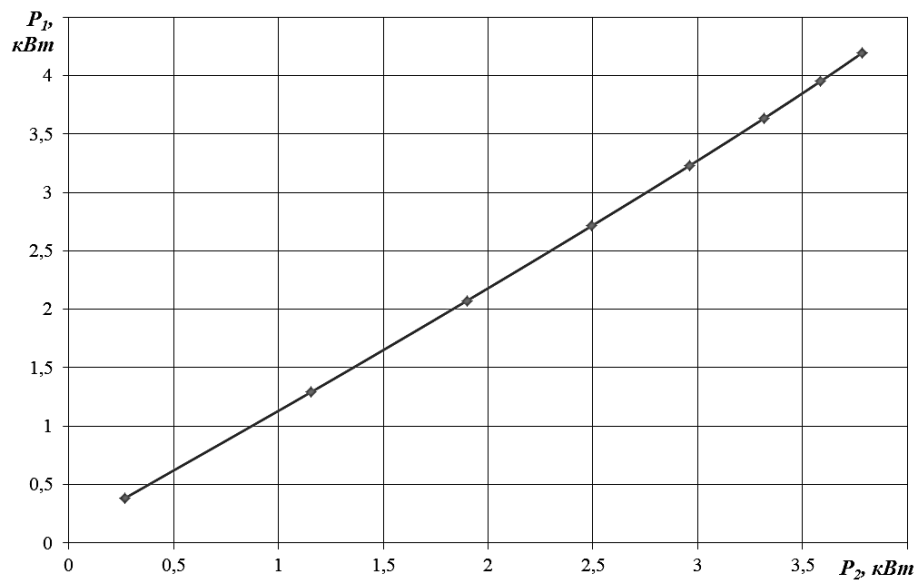


Рисунок 3.24 – Залежність спожитої потужності від потужності на валу двигуна

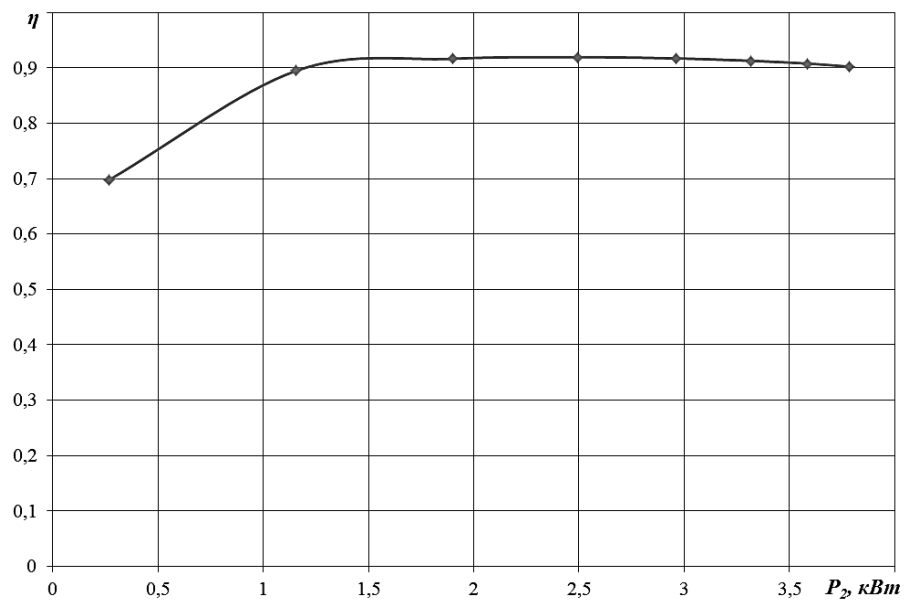


Рисунок 3.25 – Залежність ККД від потужності на валу двигуна

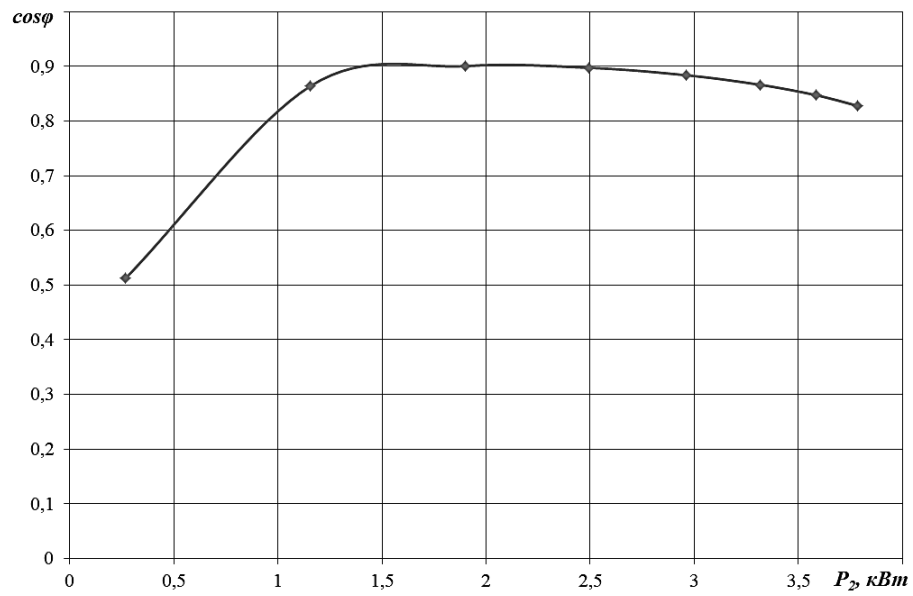


Рисунок 3.26 – Залежність $\cos \varphi$ від потужності на валу двигуна

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3008:2015. Національний стандарт України. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Український інститут науково-технічної і економічної інформації. Наказ ДП «УкрНДНЦ» від 22.06.2015 р. № 61 з 2017-07-01 – Київ.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
3. Яцун М.А. Електричні машини. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2011. – 464 с.
4. Загірняк М.В. Електричні машини: Підручник. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
5. Назар'ян Г.Н. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів. Довідниковий посібник / Г.Н. Назар'ян, Ю.М. Федюшко, О.В. Сотник, О.В. Ковальов // – Х: ТОВ «Планета-прінт», 2016. – 201 с.
6. Осташевський М.О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. В.І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
7. Двигуни електричні. Каталог. Нова Каховка: ВАТ «ПІВДЕНЬ-ЕЛЕКТРОБУД», 2007. – 22 с.
8. Черник М.А. Електричні машини: зб. задач / М.А. Черник, В.Г. Гайдук. – Львів: «Львівська політехніка», – 2008. – 226 с.
9. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.

ДОДАТОК А

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« ____ » _____ 2023 р.

**Курсовий проект (робота) з дисципліни
«Електричні машини та апарати. Частина 2»**

на тему: Розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Виконав студент _____ **курсу,** **групи** ЕЛК-22
(шифр групи)

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності підготовки)

Олександр ГРИГОРЕНКО

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник ст.викл. кафедри Е.М. Нємцев

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

(підпис)

ДОДАТОК Б.

Схеми трифазних обмоток асинхронних двигунів

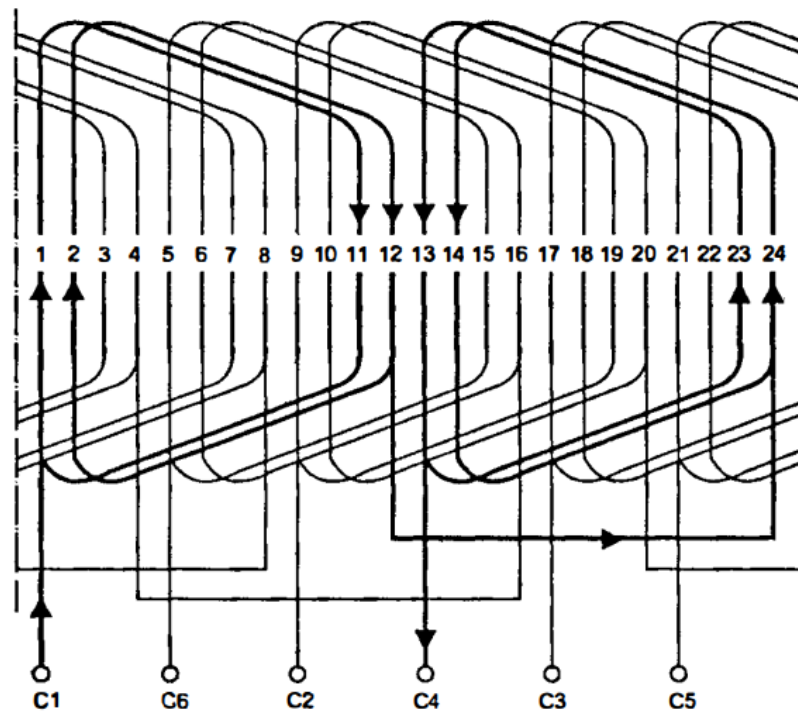


Рисунок Б.1 – Шаблонна обмотка врозвалку при $2p = 2$, $Z = 24$, $q = 4$,
 $y = 10(1 - 11)$, $a = 1$

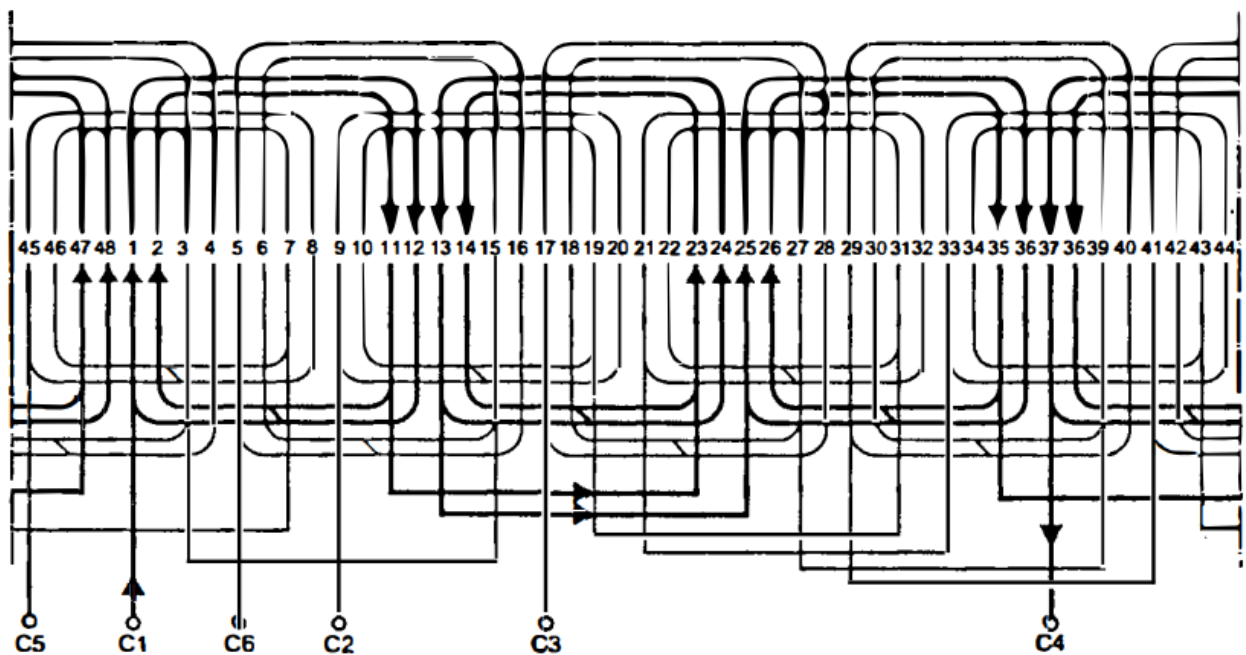


Рисунок Б.2 – Концентрична обмотка врозвалку (триплоскісна) при $2p = 4$,
 $Z = 48$, $y = 11(1 - 12)$, $a = 1$

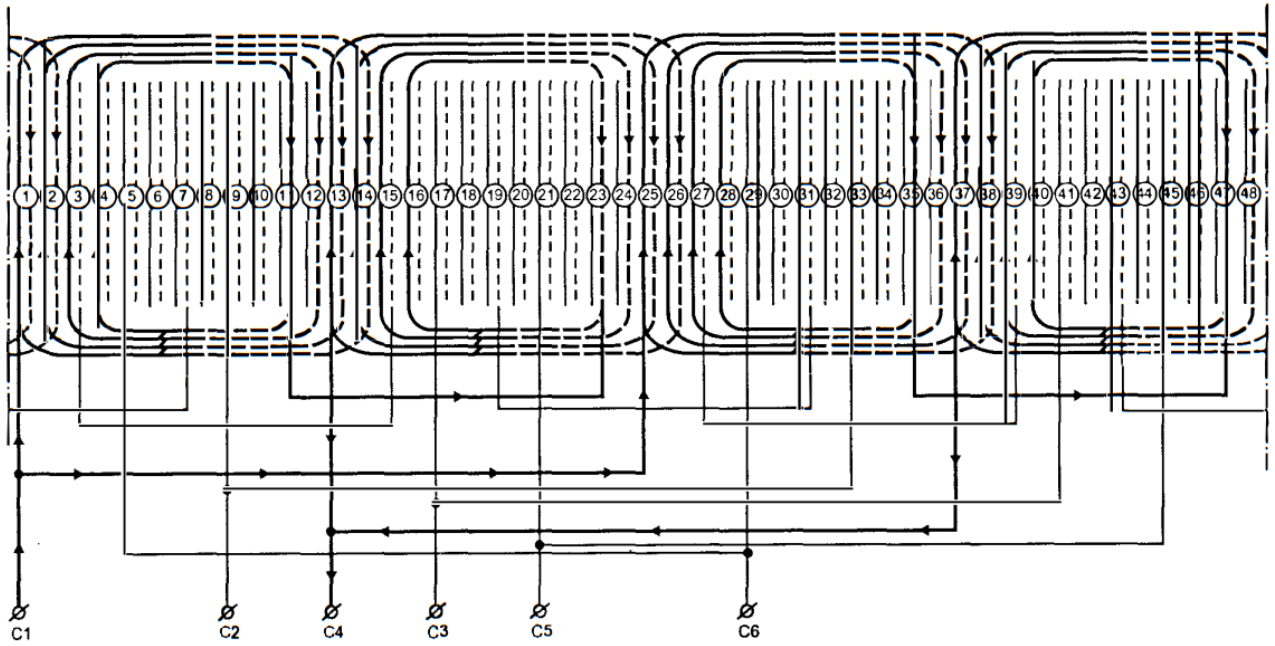


Рисунок Б.3 – Схема двошарової концентричної обмотки при $2p = 4$, $Z = 48$, $q = 4$, $y = 13(1 - 14), 11(2 - 3), 9(3 - 12), 7(4 - 11)$

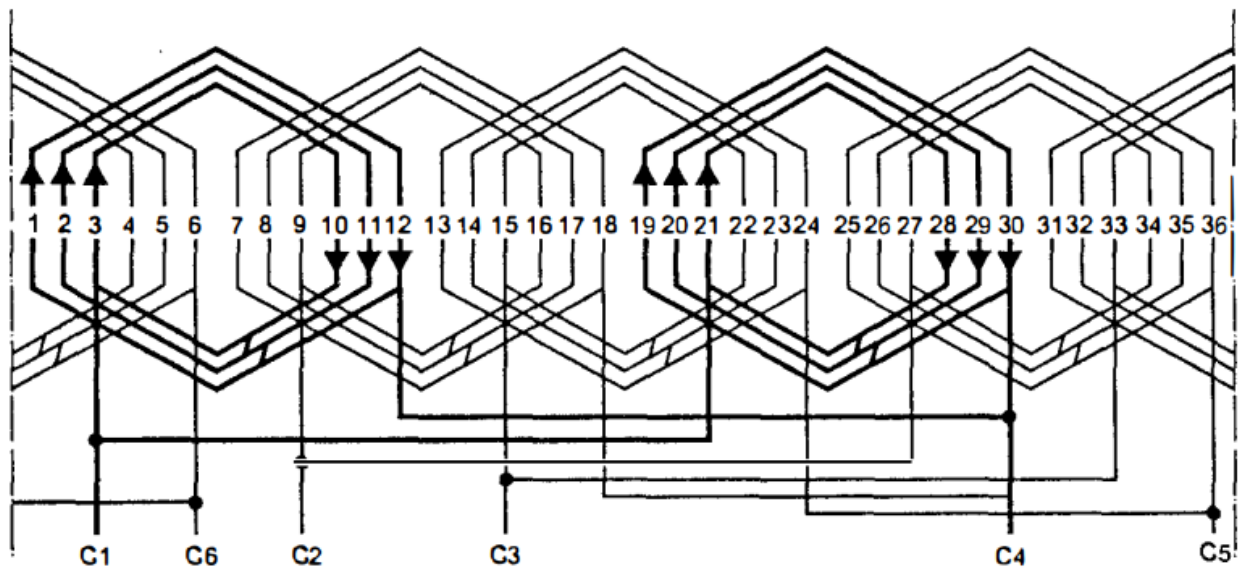


Рисунок Б.4 – Концентрична обмотка статора при $2p = 2$, $Z = 36$, $q = 3$, $a = 2$, $y = 11(1 - 12); 9(2 - 11); 7(3 - 10)$

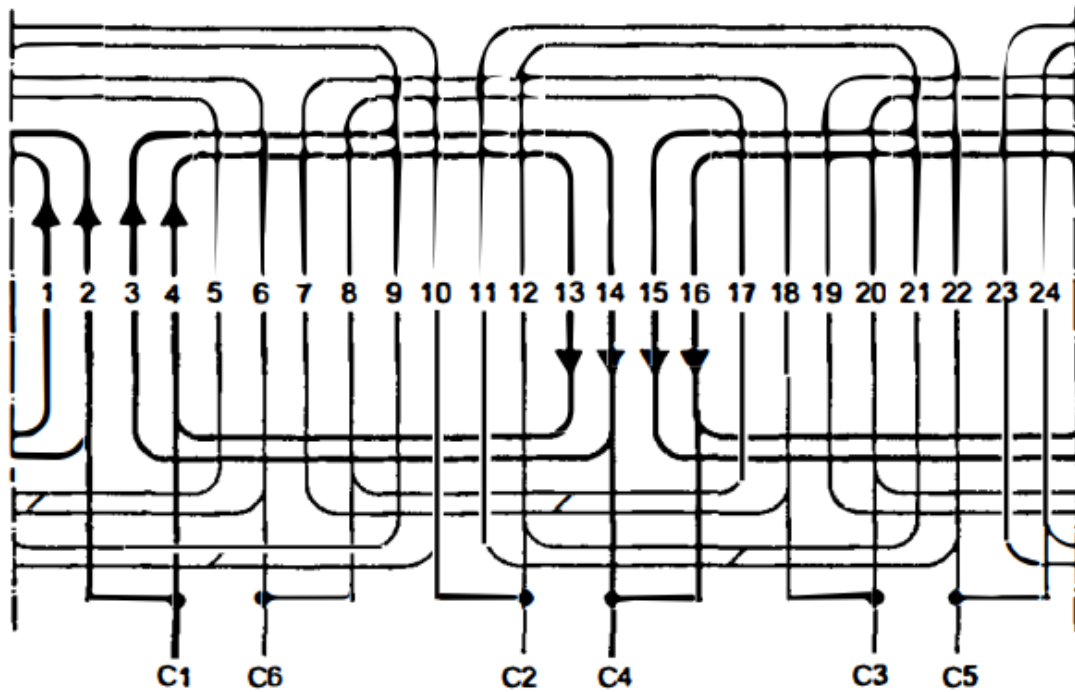


Рисунок Б.5 – Схема трифазної одношарової концентричної обмотки врозвалку (триплощинна) при $2p = 2$, $Z = 24$, $q = 4$, $a = 2$, $y = 11(1 - 12); 9(2 - 11)$

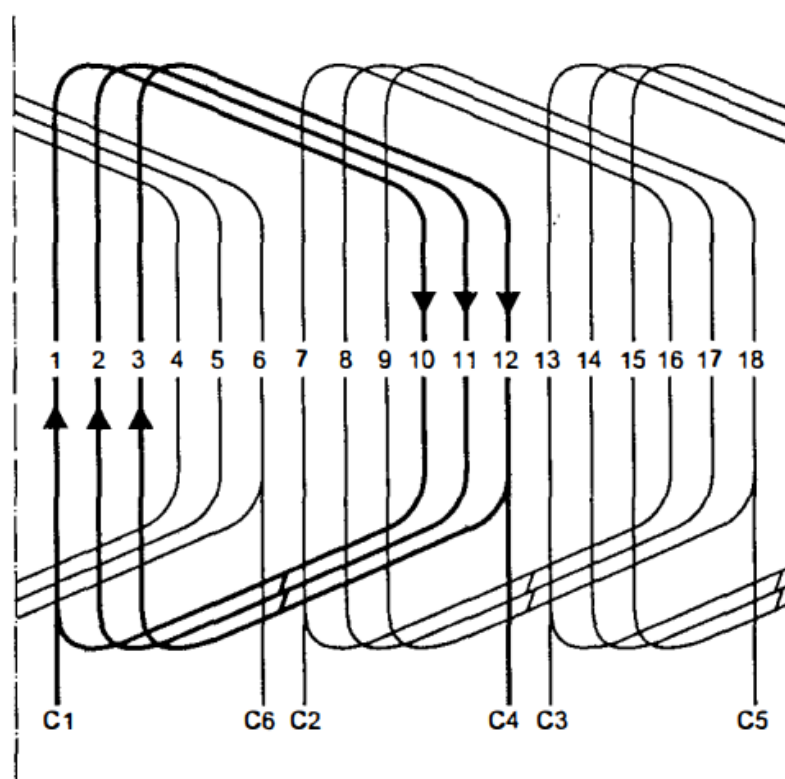


Рисунок Б.6 – Рівнокотушкова обмотка статора при $2p = 2$, $Z = 18$, $a = 1$, $y = 9(1 - 10)$,

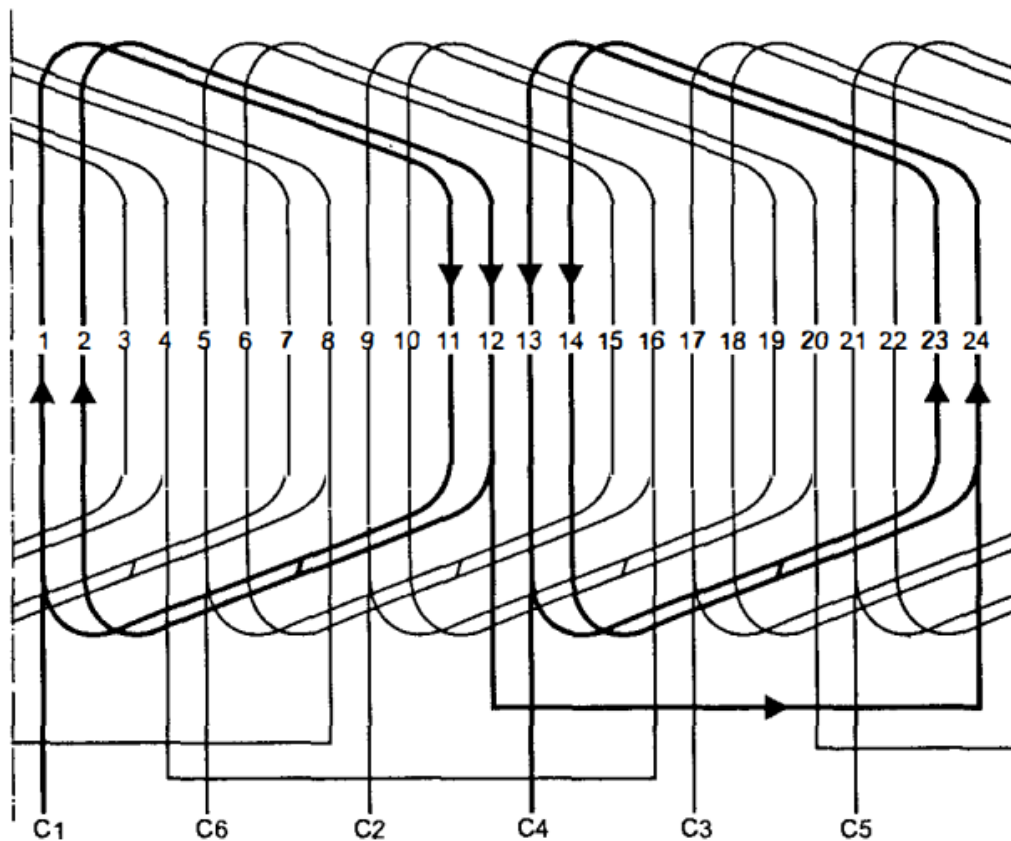


Рисунок Б.7 – Рівнокотушкова обмотка статора врозвалку при $2p = 2$, $Z = 24$,
 $q = 4$, $a = 1$, $y = 10(1 - 11)$

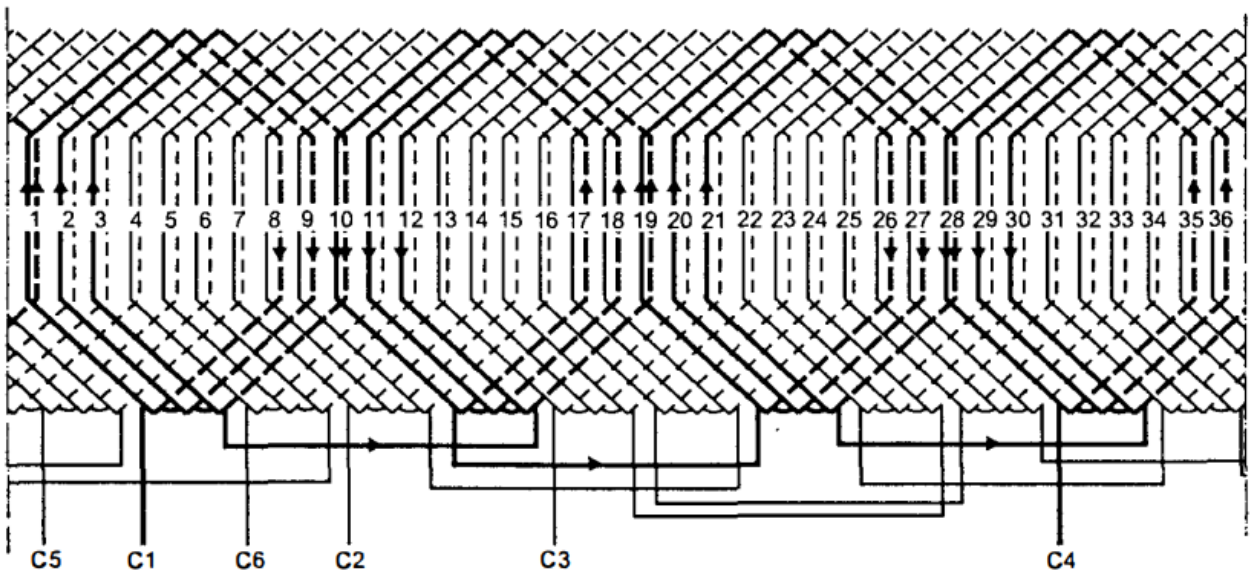


Рисунок Б.8 – Двошарова звичайна петльова обмотка статора при $2p = 4$,
 $Z = 36$, $q = 3$, $a = 1$, $y = 7$,

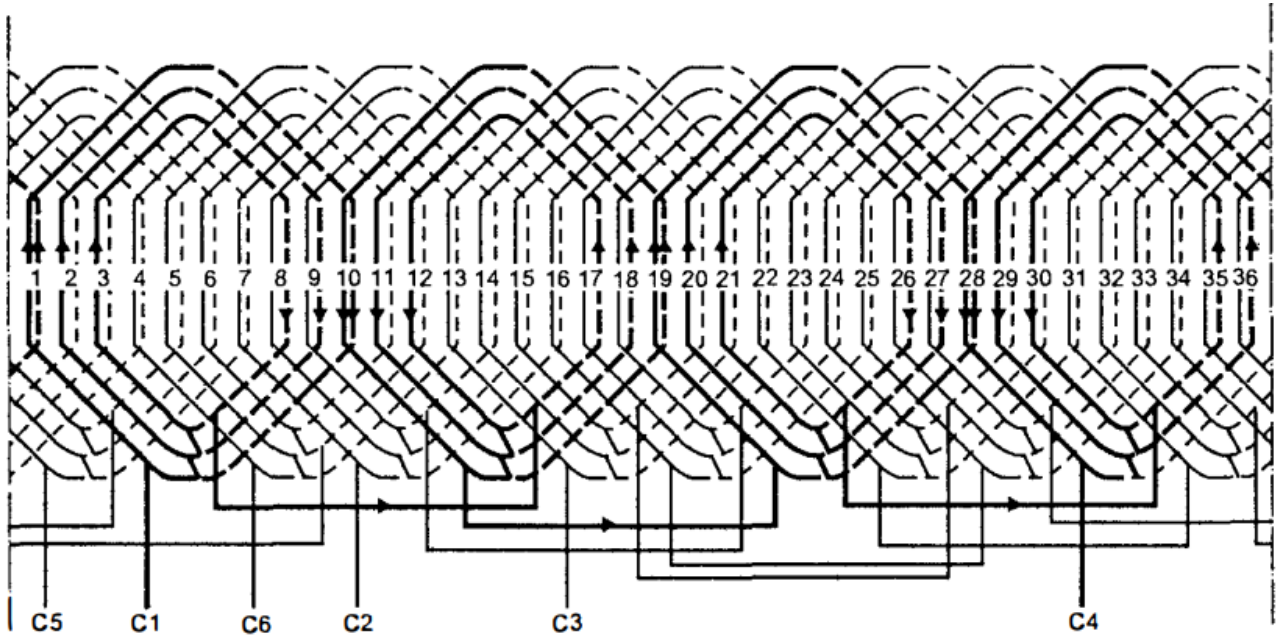


Рисунок Б.9 – Двошарова концентрична обмотка статора при $2p = 4$, $Z = 36$,
 $q = 3$, $a = 1$, $y = 9(1 - 10); 7(2 - 9); 5(3 - 8)$

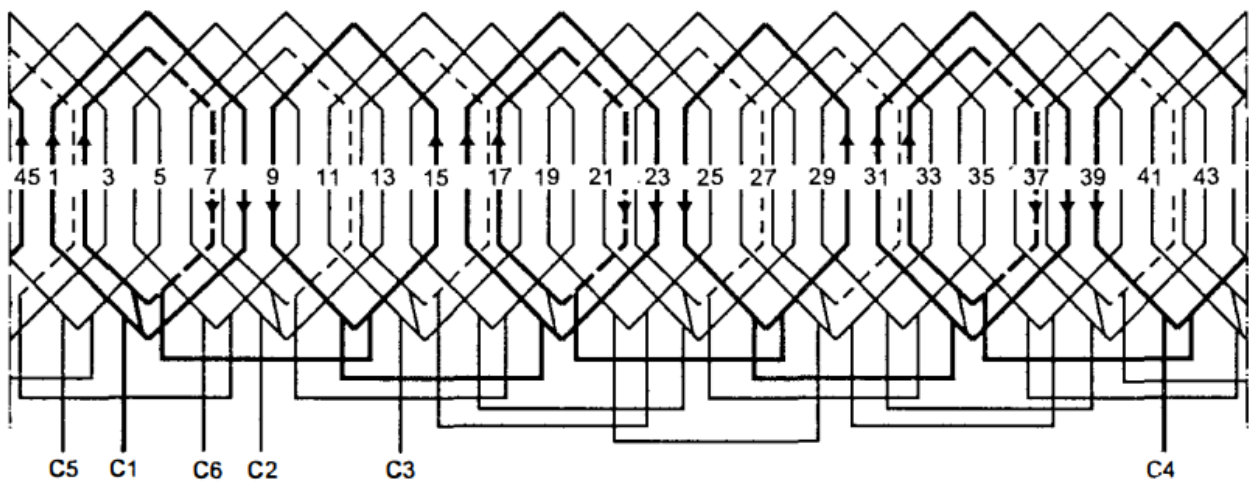


Рисунок Б.10 – Одно- і двошарова обмотка при $2p = 6$, $Z = 45$, $q = 2,5$, $a = 1$,
 $y = 7(1 - 8); 5(2 - 7); 6(1 - 7)$

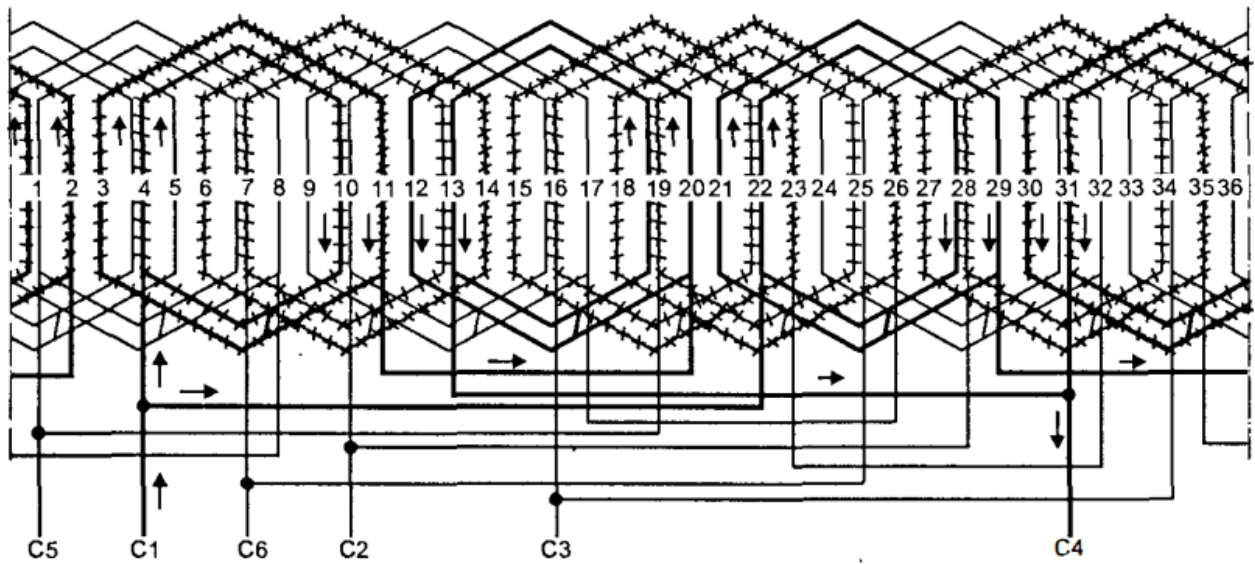


Рисунок Б.11 – Одно- і двошарова обмотка врозвалку при $2p = 4$, $Z = 36$, $a = 2$,
 $y = 8(1 - 9); 6(2 - 8)$

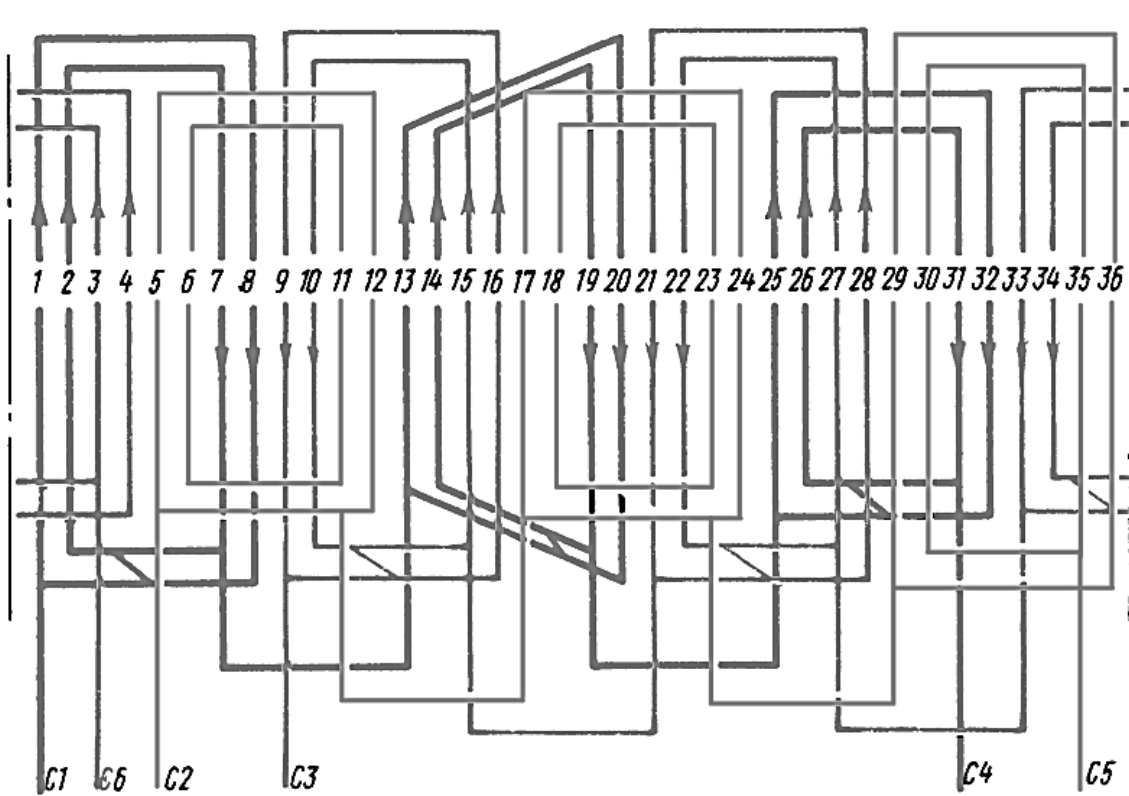


Рисунок Б.12 – Трифазна одношарова концентрична обмотка з «кривою»
 котушковою групою при $2p = 6$, $Z = 36$

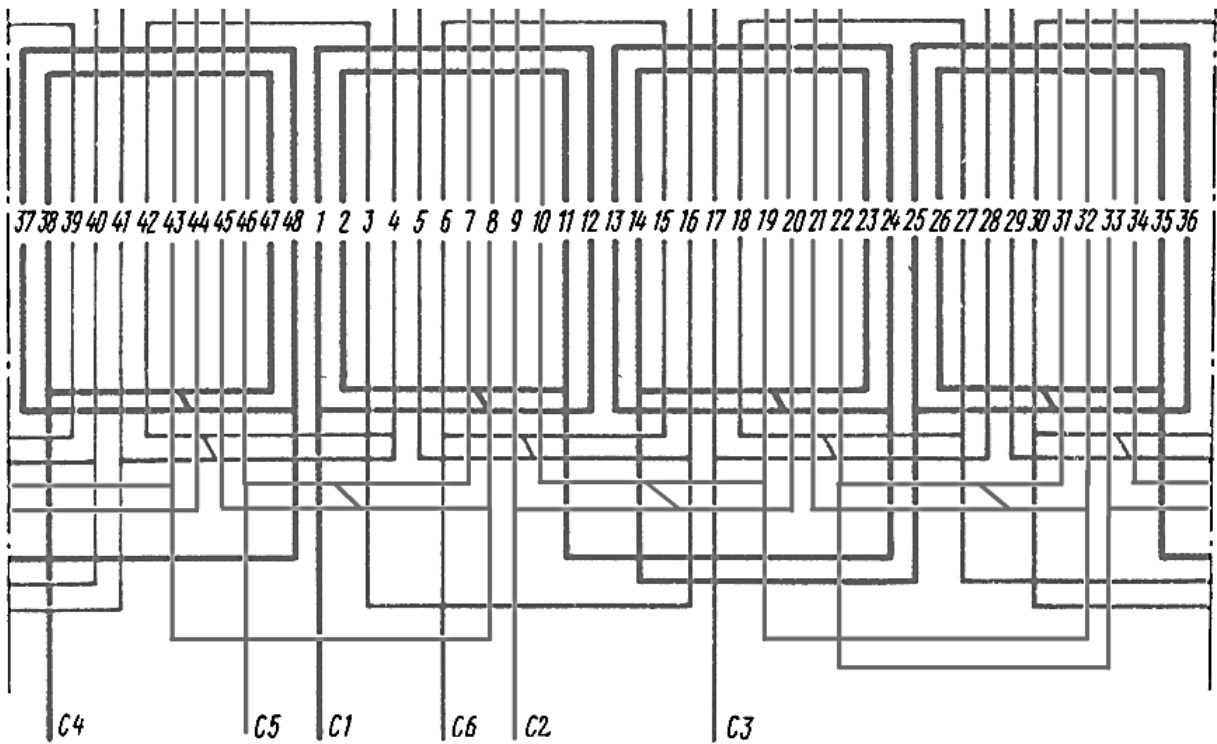


Рисунок Б.13 – Трифазна одношарова концентрична обмотка, виконана в розвалку $2p = 4$, $Z = 36$

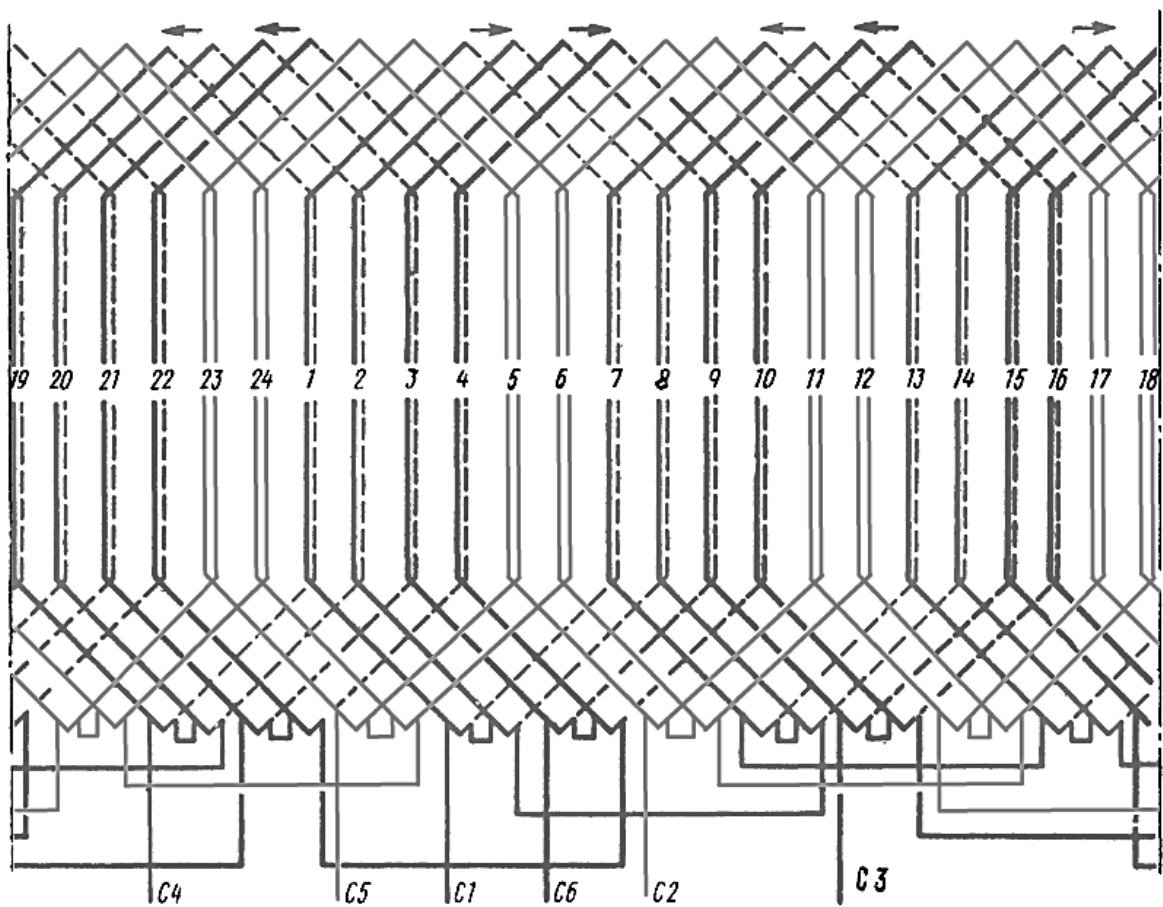


Рисунок Б.14 – Двошарова трифазна обмотка з діаметральним кроком при $2p = 4$, $Z = 24$

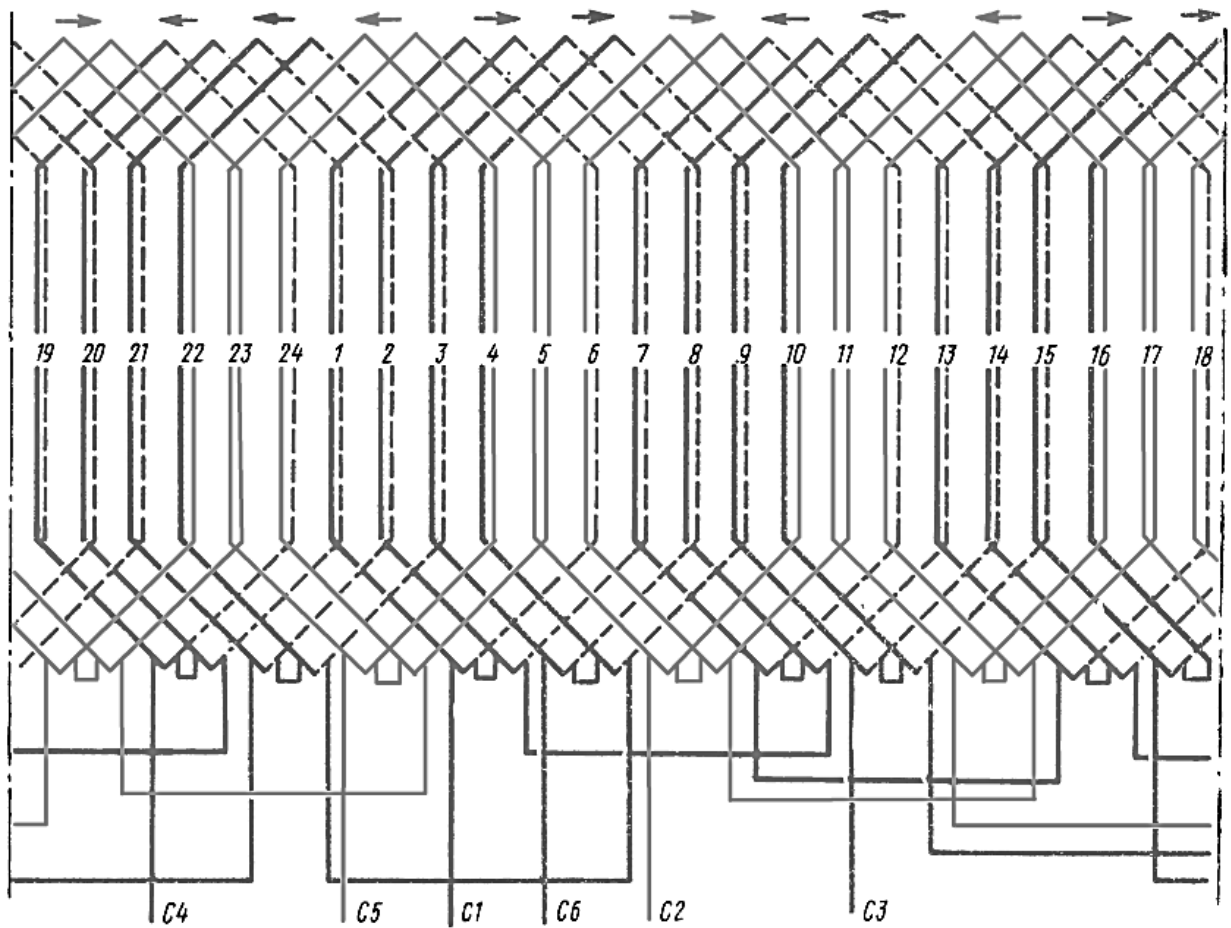


Рисунок Б.15 – Двошарова трифазна обмотка з укороченим шагом при $2p = 4$,
 $Z = 24$