

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

В. І. Мілих, В. П. Шайда, О. Ю. Юр'єва

**РОЗРАХУНОК
ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Навчально-методичний посібник
з курсового проєктування
для студентів спеціальності
«Електрична інженерія»

Харків
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



В. І. Мілих, В. П. Шайда, О. Ю. Юр'єва

РОЗРАХУНОК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Навчально-методичний посібник
з курсового проектування

для студентів спеціальності
«Електрична інженерія»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 3 від 24.10.2024 р.

Харків 2025

УДК 621.313
М60

Рецензенти:

В. В. Прус, д-р техн. наук, доцент,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,

А. Г. Серeda, д-р техн. наук, доцент,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Мілих В. І., Шайда В. П., Юр'єва О. Ю.

М60 Розрахунок двигунів постійного струму: навч.-методичний посібник [для студ. спеціальності «Електрична інженерія»]. За ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2025. – 100 с.

ISBN 978-617-8534-28-8

Надано методику розрахунку двигунів постійного струму незалежного, паралельного і послідовного збудження з висотою осі обертання 200 – 315 мм.

Розглянуто питання визначення головних розмірів двигуна, надано принципи розрахунків обмотки якоря, розмірів його паза та зубця, колектора, показано, як вибираються щітки та визначаються розміри полюсів і станини, як визначається магніторушійна сила неробочого ходу та при навантаженні, розглянуто розрахунки обмотки збудження, комутації і додаткових полюсів, показано визначення мас активних матеріалів двигуна, втрат потужності та ККД, наведено спрощені методики теплового і вентиляційного розрахунків, а також показано порядок розрахунків експлуатаційних і механічної характеристик двигуна.

Рекомендовано зміст та обсяг пояснювальної записки курсового проєкту та його графічної частини.

Призначено для студентів спеціальності «Електрична інженерія».

Іл. 50. Табл. 30. Бібліогр. 11 назв.

УДК 621.313

ISBN 978-617-8534-28-8

© В. І. Мілих, В. П. Шайда, О. Ю. Юр'єва, 2025
© НТУ «ХПІ», 2025

ВСТУП

Навчально-методичний посібник з курсового проектування призначено для студентів другого (магістерського) рівня освітньої програми «Електромеханіка» спеціальності «Електрична інженерія».

Курсовий проєкт з розрахунку двигунів постійного струму (ДПС) має мету ознайомити студентів з сучасними методами і основними проблемами проектування машин постійного струму, навчити застосовувати отримані знання при розв'язанні реальної інженерної задачі, а також набути навичок самостійної розрахункової роботи.

Цей навчально-методичний посібник дозволяє розрахувати ДПС потужністю 30–200 кВт з частотою обертання 500–3000 об/хв незалежного, паралельного і послідовного збудження з висотою осі обертання 200–315 мм.

Посібник складається з чотирнадцяти розрахункових розділів: визначення головних розмірів двигуна, розрахунків обмотки якоря, розмірів його паза і зубця, колектора, вибору щіток, визначення розмірів полюсів і станини, визначення магніторушійних сил (МРС) неробочого ходу і при навантаженні, розрахунків обмотки збудження, комутації і додаткових полюсів, визначення мас активних матеріалів двигуна, втрат потужності та ККД, наведено методики теплового і вентиляційного розрахунків, розрахунків характеристик двигуна.

Окремо видається навчально-методичний посібник «Конструювання двигуна постійного струму», який разом з цим посібником складає єдиний комплект щодо курсового проектування машин постійного струму.

Базовими джерелами для створення цього навчально-методичного посібника щодо проектування ДПС є [1, 2], питання його забезпечення можна знайти також у [3] та інших популярних раніше першоджерелах. Для початкового ознайомлення з ДПС рекомендується підручник [4], при подальшому більш глибокому вивченні теоретичних і практичних основ – джерела [5, 6].

У виданні застосована система літерних позначень величин та параметрів, необхідних для опису стану та процесів ДПС, орієнтована на міжнародні стандарти і у тому числі Державні стандарти України (ДСТУ) [7].

Кожен студент отримує індивідуальне завдання на розробку проєкту ДПС та виконує його, користуючись методичними вказівками, рекомендованою літературою, заводськими та іншими матеріалами. Завдання містить основні дані для проектування машини, вимоги до конструктивного виконання, а також графік виконання проєкту по тижнях семестру з вказівкою обсягу кожного розділу у відсотках від загального обсягу проєкту, що надано в табл. 1.

Окремі розділи проєкту мають бути виконані і надані для перевірки керівникові в строки, вказані в таблиці.

Таблиця 1 – Обсяги і терміни виконання проєкту

Найменування розділу проєкту	Обсяг виконання, %	Строки виконання (номер тижня семестру)
Визначення головних розмірів	5	1
Розрахунок обмотки якоря та визначення розмірів паза	10	2
Розрахунок колектора та вибір щіток, визначення розмірів полюсів та станини	10	3
Визначення МРС при неробочому ході та навантаженні, розрахунок обмотки збудження	10	4
Розрахунок комутації та додаткових полюсів	5	5
Визначення втрат, ККД та мас активних матеріалів	10	6
Тепловий та вентиляційний розрахунок	10	7
Розрахунок характеристик	10	8
Розробка конструкції та механічний розрахунок	25	9
Завершення оформлення креслеників і записки	5	10
Захист проєкту	–	11

Проєкт складається з розрахункової та графічної частин. Розрахункова частина виконується у вигляді пояснювальної записки на аркушах формату А4 (210×297 мм) і містить необхідні рисунки.

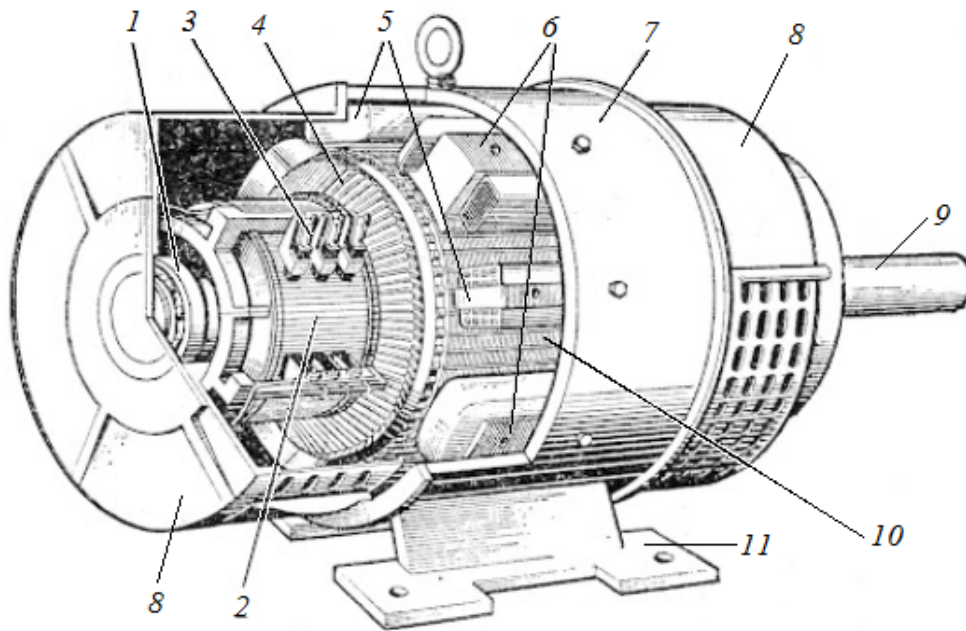
Оформлення виконаного проєкту повинно відповідати нормативним вимогам, які викладено в документах [8, 9].

Графічна частина проєкту містить кресленики поздовжнього і поперечного перерізів електричної машини та деяких її вузлів і деталей, виконаних на трьох аркушах формату А1. Кресленики мають відповідати вимогам чинних стандартів та правил [8]. Специфікації до креслеників виконується на окремих аркушах формату А4 та розташовуються наприкінці пояснювальної записки.

Курсовий проєкт у повному обсязі повинен містити завдання, відомість проєкту, пояснювальну записку, конструкторські документи.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДВИГУНИ, ЩО ПРОЄКТУЮТЬСЯ

Для переходу до проєктування нагадаємо про його об'єкт, тобто ДПС серії 4П, приклад конструкції якого надано на рис. 1.1 з виділенням її основних складових елементів.



1 – вальниця; 2 – колектор; 3 – щітки; 4 – обмотка якоря; 5 – додаткові полюси (осердя з котушками); 6 – головні полюси (осердя з котушками); 7 – станина; 8 – вальницьві щити; 9 – вал; 10 – осердя якоря; 11 – лапа

Рисунок 1.1 – Конструкція ДПС

На рис. 1.2 показана структура електромагнітної системи чотириполюсного ДПС. Вона сформована поєднанням його поперечного і повздовжнього перерізів у тривимірній системі прямокутних координат x , y , z по спільній для них осі y .

Для кожного з перерізів зображена симетричні чверті відповідних повних поперечного і повздовжнього перерізів. Позначені аксіальні довжини осердь якоря l_{je} і головного полюса l_p , станини l_s та активна довжина двигуна по проміжку l_a . Аксіальна довжина осердя додаткового полюса має позначення l_d , але на рисунку не показана.

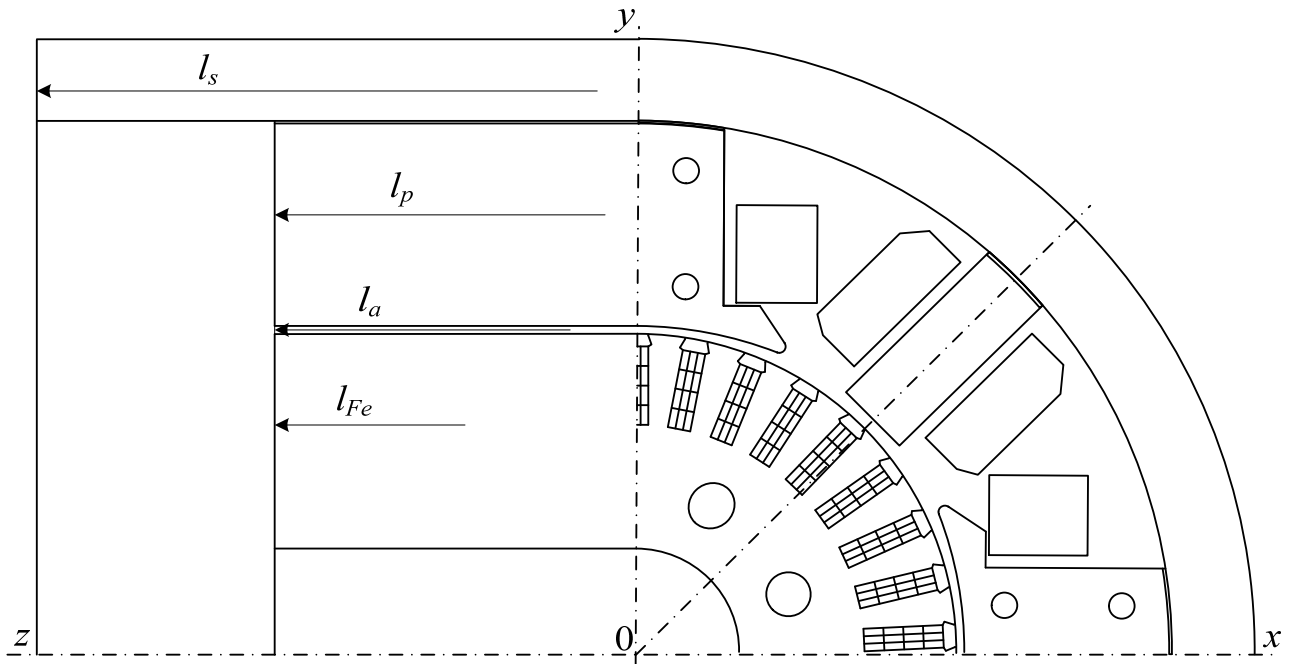


Рисунок 1.2 – Структура електромагнітної системи ДПС

Схеми з'єднання обмоток двигуна надано на рис. 1.3, де позначено затиски обмоток: $A1-A2$ –якоря; $B1-B2$ – додаткових полюсів та обмоток збудження $F1-F2$ – незалежної, $E1-E2$ – паралельної та $D1-D2$ – послідовної. Позначено струми відповідних обмоток та повний струм I якірного кола двигуна. На електричне коло якоря подається напруга U , а на обмотку незалежного збудження ще окремо напруга U_E .

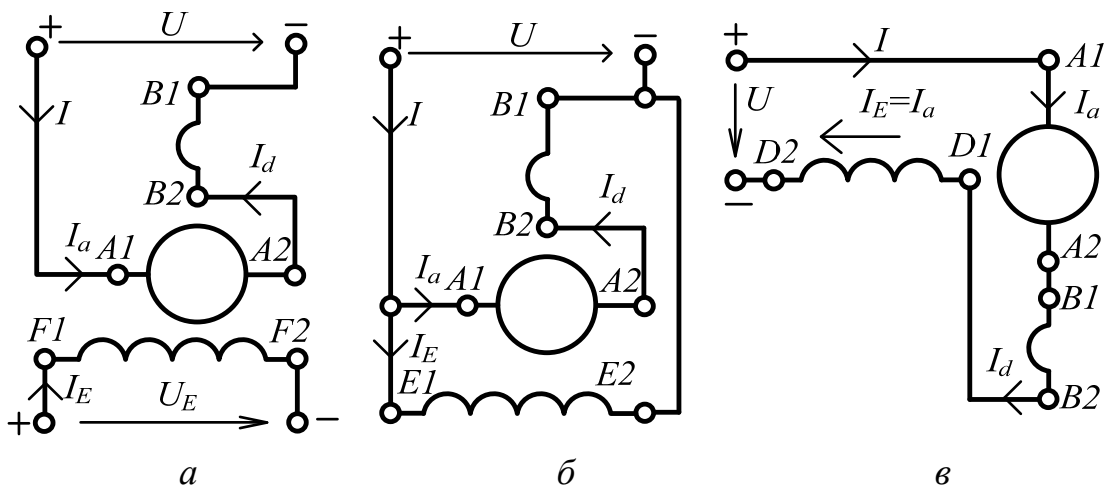


Рисунок 1.3 – Схеми збудження двигуна: незалежне (а), паралельне (б) та послідовне (в)

Структуру обмоток і напрямки їхніх струмів в конструкційній схемі ДПС показано на рис. 1.4.

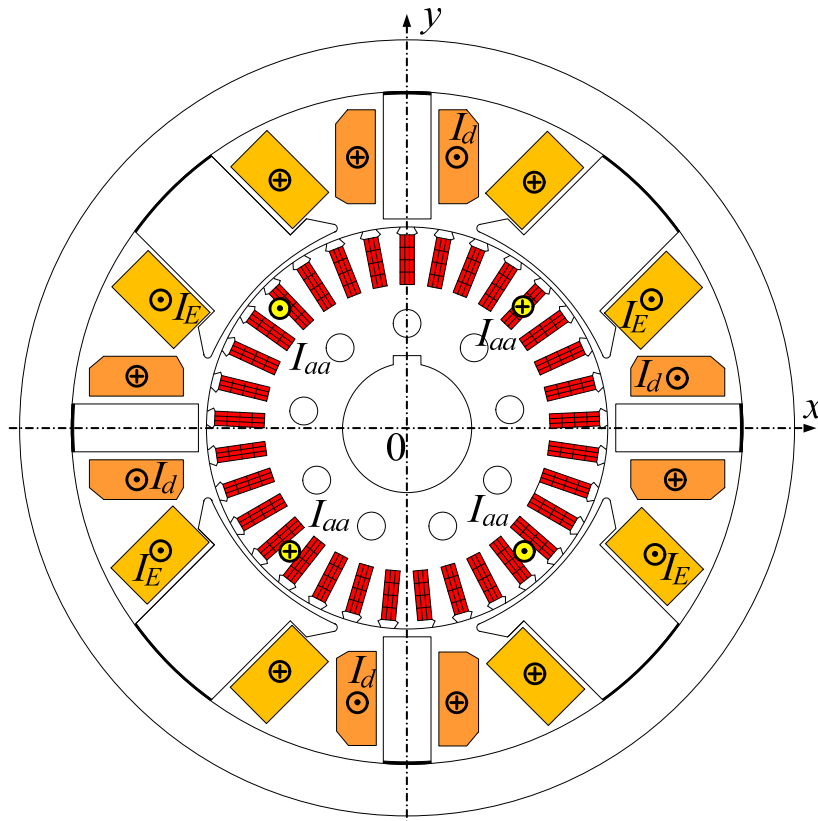


Рисунок 1.4 – Узгоджена система напрямків струмів в обмотках ДПС

Електричні машини постійного струму серії 4П висотою осі обертання 200–280 мм, а також 315–400 мм необхідні для комплектації електроприводів постійного струму загальнопромислового призначення (папероробних, фарбувально-оздоблювальних та підйомно-транспортних машин, полімерного обладнання, а також бурильних станків і допоміжних агрегатів екскаваторів).

Умовне кодове позначення машин постійного струму серії 4П, приміром, 4ПНМ200СУХЛ4, 4ПФМ225СУХЛ4, 4ППМ280СУХЛ4, 4ПФМ315МУХЛ4 тощо має таку структуру:

4П → позначення серії машини

X → позначення машини залежно від виконання за ступенем захисту та способу охолодження:

Ф – захищене IP23 з незалежною вентиляцією від стороннього вентилятора IC06;

Н – захищене IP23 з самовентильацією;

П – закрите IP44 (захищене IP23) продувається від стороннього вентилятора IC37 (IC17);

Б – закрите IP44 з природною вентиляцією IC0041;

О – обдуваний IC0141;

М → модифікація серії 4П;
ХХ → електрична модифікація: Г – генератор; 2В – збуджувач; відсутність знаку – двигун;
ХХХ → висота осі обертання в мм;
Х → умовна довжина осердя якоря: S – перша довжина; М – друга довжина; L – третя довжина;
П – підвищена точність (відсутність знаку – нормальна точність);
Г – наявність тахогенератора;
Б – температурний захист;
УХЛ4 – кліматичне виконання та категорія розміщення.

Типи і основні параметри електродвигунів потужністю від 30 кВт до 200 кВт основного виконання і модифікацій наведені в додатку Д.

Режим роботи двигунів постійного струму серії 4П тривалий S1 за ДСТУ EN 60034-1. Вони допускають роботу в режимах S2–S8 при умові, що середньоквадратичний струм за цикл не перевищує номінальне значення.

Збудження двигунів незалежне напругою 110 В або 220 В.

Номінальні дані електродвигунів з висотою осі обертання 200–280 мм наведені в табл. Д.1 (електродвигуни захищеного виконання IP23 з самовентиляцією IC0A1) та в табл. Д.2 (електродвигуни захищеного виконання IP23 з незалежною вентиляцією IC0A6) і продувне від стороннього вентилятора IC1A7 та закритого виконання IP44 продувні від стороннього вентилятора IC3A7).

Електродвигуни типів 4ППМ, 4ПОМ і 4ПБМ мають ступінь захисту IP44, увідний пристрій усіх типів машин – також IP44 за ДСТУ ІЕС 60034-5.

Спосіб охолодження електродвигунів IC0A1, IC0A6, IC4A1A0, IC4A1A1, IC1A7, IC3A7 за ДСТУ EN 60034-1.

Електродвигуни з висотою осі обертання 200–280 мм випускаються в конструктивному виконанні IM1001, IM1011, IM1012, IMB2001, IMB2011, IM1002, IM2002, IM2012 за ДСТУ EN 60034-7. Електродвигуни з висотою осі обертання 280 мм випускаються також у виконанні IM1031, IM1032, IM2031, IM3001, IM3011 і IM3031.

Номінальні дані електродвигунів постійного струму серії 4ПФМ висотою осі обертання 315–400 мм надано в табл. Д. 3.

Ступінь захисту цих електричних машин IP23, клемна коробка усіх типів машин – IP44 за ДСТУ ІЕС 60034-5.

Спосіб охолодження електродвигунів ІС06 за ДСТУ EN 60034-6.

Механічні дії на двигуні нормовані за групою М8 відповідно стандарту.

Електродвигуни з висотою осі обертання 315–400 мм випускаються в конструктивному виконанні ІМ1001, ІМ1002, ІМ1003, ІМ2001, ІМ2002 за ДСТУ EN 60034-7.

Приклади зовнішнього вигляду ДПС серії 4П надано на рис. 1.5 (зверху на їхньому корпусі розташований вентилятор-наїзник).

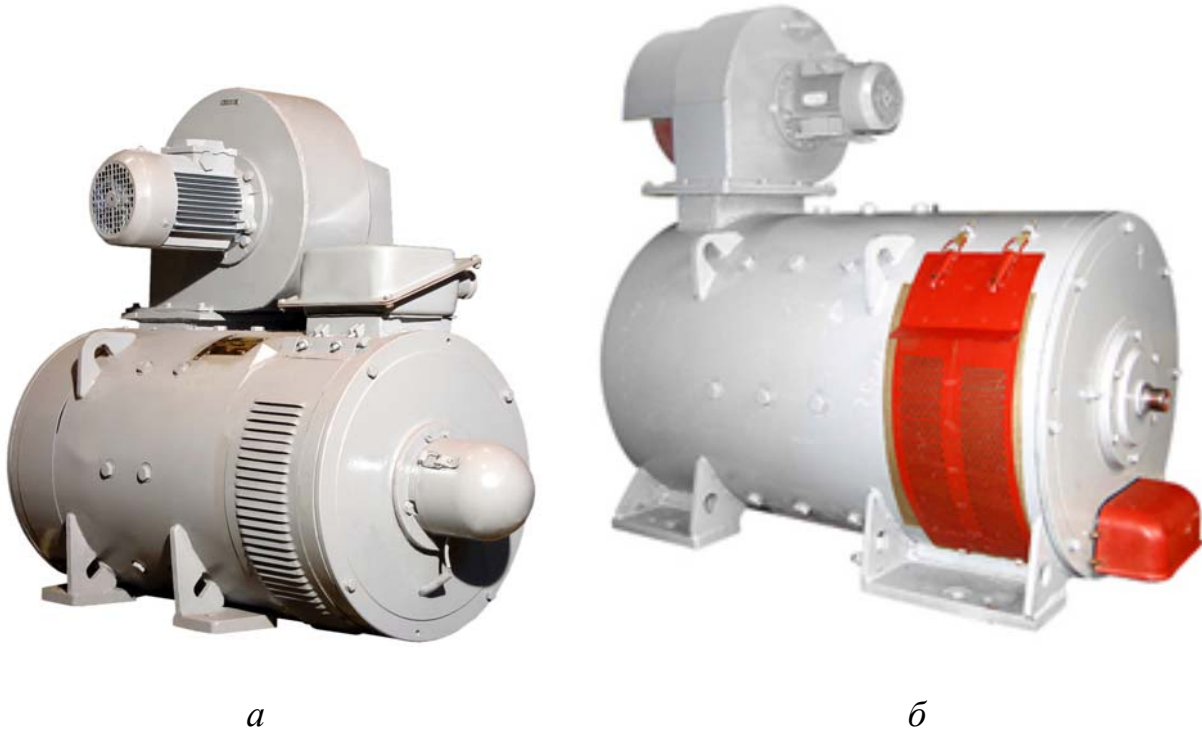


Рисунок 1.5 – Приклади зовнішнього вигляду ДПС представників серії 4П:
a – з висотою осі обертання 200–280 мм; *б* – з висотою осі обертання 315–400 мм

Як відомо, принцип дії ДПС заснований на взаємодії магнітних полів його обмоток збудження і якоря, які створюються струмами цих обмоток. При проектуванні ДПС розраховується магнітне поле обмотки збудження на основі теорії магнітних кіл [4, 10], і лише в режимі неробочого ходу. Але в режимі навантаження ДПС діє спільне магнітне поле обмоток збудження, якоря та додаткових полюсів і його структура стає набагато складнішою.

Уявлення про розподіли струмів в обмотках і магнітного поля ДПС в режимах неробочого ходу і номінального навантаження дають зображення на рис. 1.6 і 1.7, які отримані чисельними розрахунками магнітного поля в чотириполюсному двигуні типу 4ПНЖ200 потужністю 60 кВт за допомогою програми FEMM [11].

При розрахунку магнітного поля даного двигуна, як і взагалі машин постійного струму з різними аксіальними довжинами, які показано на рис. 1.2, ця неоднорідність довжин враховується [10]. Тому не слід зважати на згущення силових ліній магнітного поля в станині. При переході від розрахункової моделі ДПС до реальної конструкції магнітна індукція в станині ділиться на, так званий, коефіцієнт зведення її довжини, який може знаходитися в різних двигунах в діапазоні від 1,4 до 1,9.

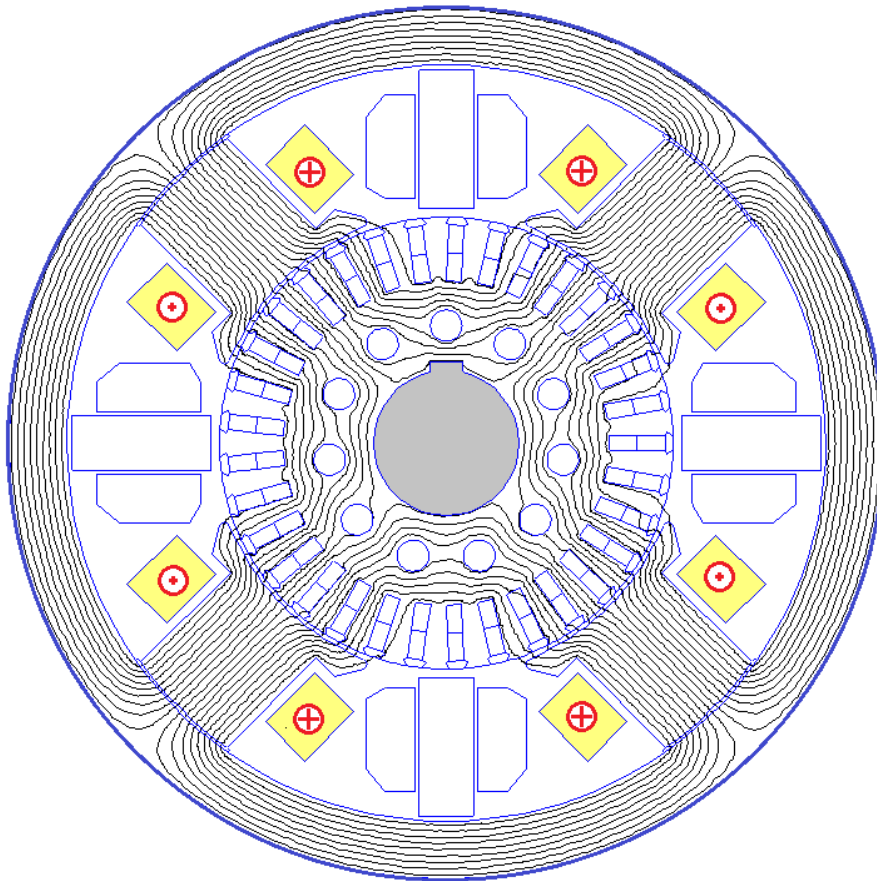


Рисунок 1.6 – Картина силових ліній магнітного поля ДПС
в режимі неробочого ходу

На рис. 1.7, порівняно з рис. 1.6, видно перерозподіл магнітного поля у зоні виступів наконечників головних полюсів. Під одними виступами силові лінії розріджуються, під іншими згущуються – це, так званий, «перекіс» магнітного поля. Таке відбувається внаслідок дії реакції якоря. При проектуванні ДПС це враховується без розрахунку магнітного поля, а лише умовно за допомогою перехідної характеристики, отриманої на основі характеристики неробочого ходу.

Наочне уявлення про зазначені явища дають саме результати розрахунків магнітного поля, наведені на рис. 1.6 і 1.7.

Відомо, що в провідниках обмотки якоря, які проходять зони комутації під додатковими полюсами, відбувається зміна напрямку струму з відповідним швидким переходом від додатного значення до від'ємного і навпаки. Це відображено на рис. 1.7 зміною кольору густини струму в провідниках комутувальних секцій обмотки якоря за кольоровою шкалою, яка прийнята в програмі FEMM. У решті провідників поза зонами комутації густина струму є однаковою і максимальною, причому під одними головними полюсами вона додатна, під іншими – від'ємна відповідно до напрямків струму якоря на рис. 1.4 і 1.7.

Описане явище має загальну назву – комутація ДПС, яка виражається в переключенні напрямку струму в секціях обмотки якоря, сторони яких проходять під додатковими полюсами. Це переключення відбувається за допомогою щіток і колектора, що є основою роботи ДПС, але призводить і до проблем їхньої експлуатації. Тому для зменшення негативних наслідків комутацій в ДПС запроваджено необхідні засоби, а також розрахунок комутації при їхньому проектуванні.

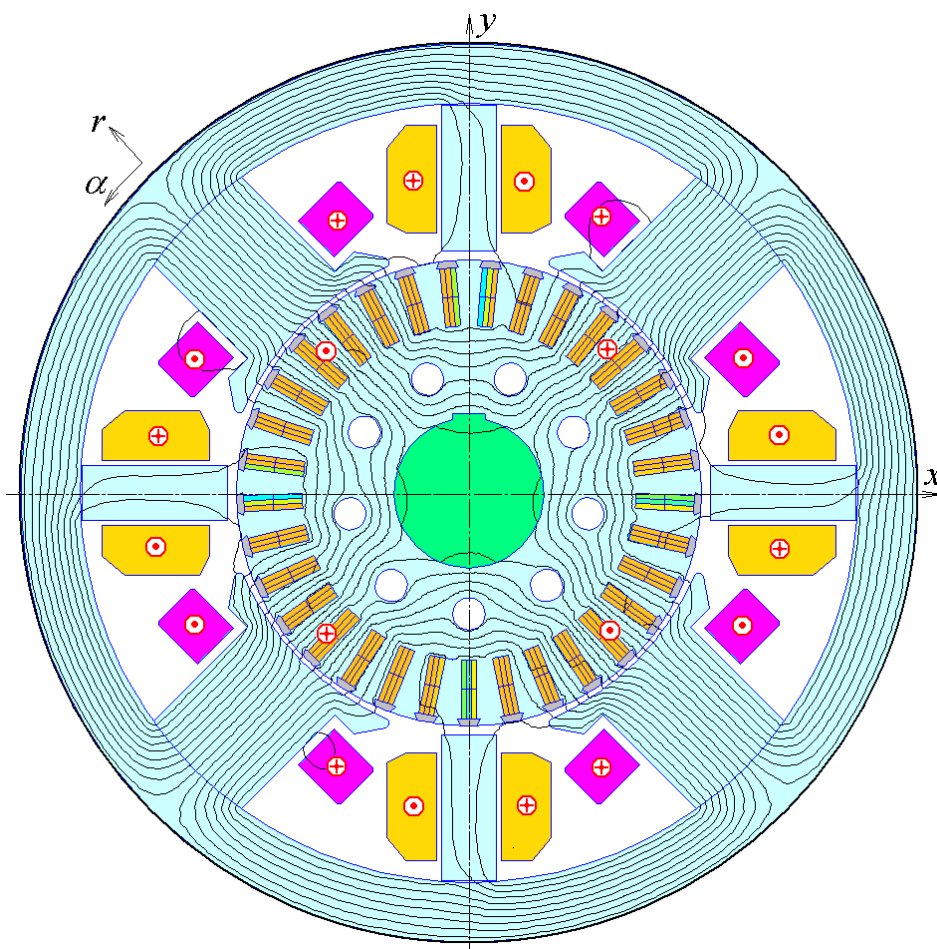


Рисунок 1.7 – Картина силових ліній магнітного поля ДПС в режимі номінального навантаження

2 ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТУВАННЯ

Для розрахунку двигуна постійного струму (ДПС) задаються такі вихідні дані:

2.1 Номінальна потужність P_N , кВт.

2.2 Номінальна напруга U_N , В.

2.3 Номінальна частота обертання n_N , об/хв.

2.4 Максимальна частота обертання n_{max} , об/хв (якщо не задано конкретне значення, то приймається $n_{max} = 1,25n_N$ – при паралельному збудженні, $n_{max} = 2n_N$ – при послідовному збудженні).

2.5 Збудження двигуна: незалежне, паралельне або послідовне (при незалежному збудженні надається напруга незалежного джерела U_E).

2.6 Режим роботи тривалий S1 за ДСТУ EN 60034-1.

2.7 Ступінь захисту IP22 за ДСТУ EN 60034-5 (захищена).

2.8 Система охолодження IC01 за ДСТУ EN 60034-6 (захищена машина з самовентиляцією, вентилятор розташований на валу машини).

2.9 Виконання за способом монтажу IM1001 за ДСТУ EN 60034-7 (машина з двома вальницьевими щитами на лапах з одним горизонтально спрямованим циліндричним кінцем вала).

2.10 Система ізоляції класу нагрівостійкості 155 °C (F) за IEC 60085.

2.11 Базовою конструкцією прийняти конструкцію машини постійного струму серії 4П.

В цілому двигуни, що розробляються, повинні відповідати Національному стандарту України ДСТУ EN 60034-1:2016 (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT) Машини електричні обертові.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

Електромагнітна система ДПС з позначенням основних розмірів в її поперечному перерізі надана на рис. 3.1.

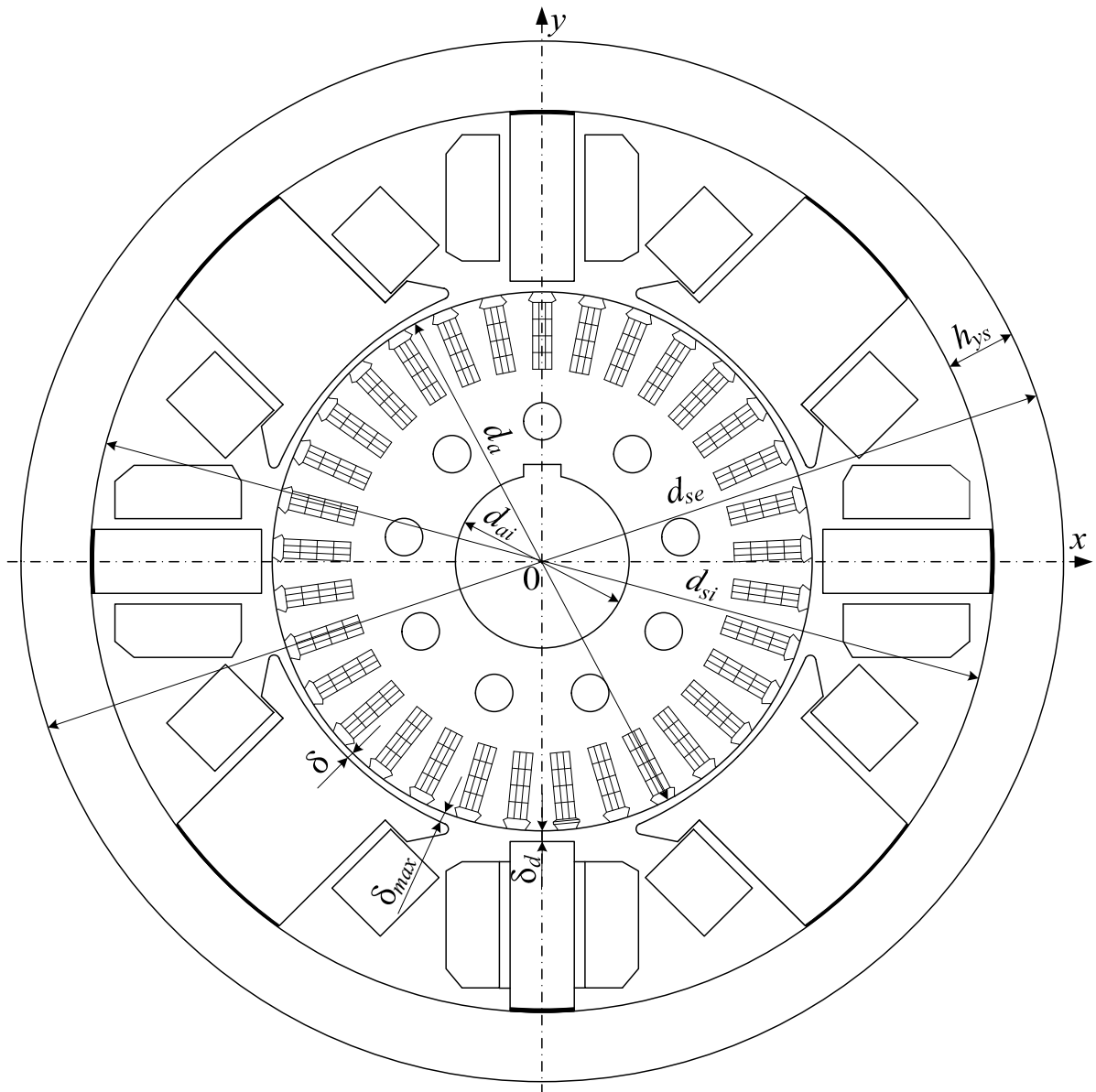


Рисунок 3.1 – Розрахункова електромагнітна система ДПС

Головними розмірами ДПС є зовнішній діаметр якоря d_a і розрахункова довжина якоря l_{Fe} , які визначають увесь хід подальшого розрахунку двигуна.

Головні розміри пов'язані з електромагнітними навантаженнями: магнітною індукцією в повітряному проміжку B_δ і лінійним навантаженням A .

3.1 Вибрати висоту осі обертання h по табл. 3.1 залежно від номінальних потужності P_N та частоти обертання n_N .

Таблиця 3.1 – До визначення висоти осі обертання ДПС

h , мм	P_N (кВт) при різних значеннях n_N (об/хв)					
	3000	2200	1500	1000	750	600
Двигуни виконання по захисту IP22 із способом охолодження IC01						
200	45	37	22	15	–	–
	55	45	30	18,5	11	7,5
225	–	–	–	–	15	11
	75	55	37	22	18,5	15
250	90	75	45	30	22	18,5
	–	90	55	37	30	22
280	–	110	75	45	37	30
	–	132	90	55	45	–
315	–	160	110	75	55	37
	–	–	132	–	–	–
	–	–	160	90	–	45
	–	–	200	110	75	55

3.2 Вибрати зовнішній діаметр якоря d_a , зовнішній діаметр станини d_{se} , допустиму відстань від нижньої частини корпусу машини до опорної площини лап h_1 (рис. 3.2) та кількість полюсів $2p$ по табл. 3.2.

3.3 Розрахункова потужність двигуна, кВт,

$$P_{calc} = P_N \cdot \frac{1+\eta}{2\eta},$$

де P_N – з п. 2.1; орієнтовне значення ККД η вибирається з рис. 3.3 залежно від номінальних потужності P_N та частоти обертання n_N .

Таблиця 3.2 – До вибору головних розмірів ДПС

Висота, мм		Діаметри, мм		$2p$
h	h_1	d_{se}	d_a	
200	7	386	202	4
225	7	436	228	4
250	8	484	261	4
280	8	544	294	4
315	9	612	327	4

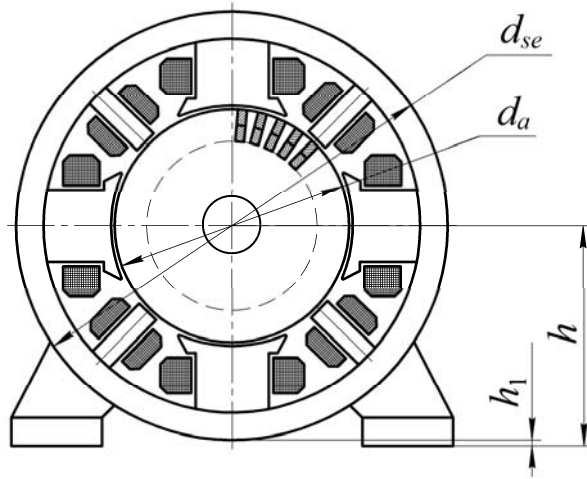


Рисунок 3.2 – Головні розміри ДПС

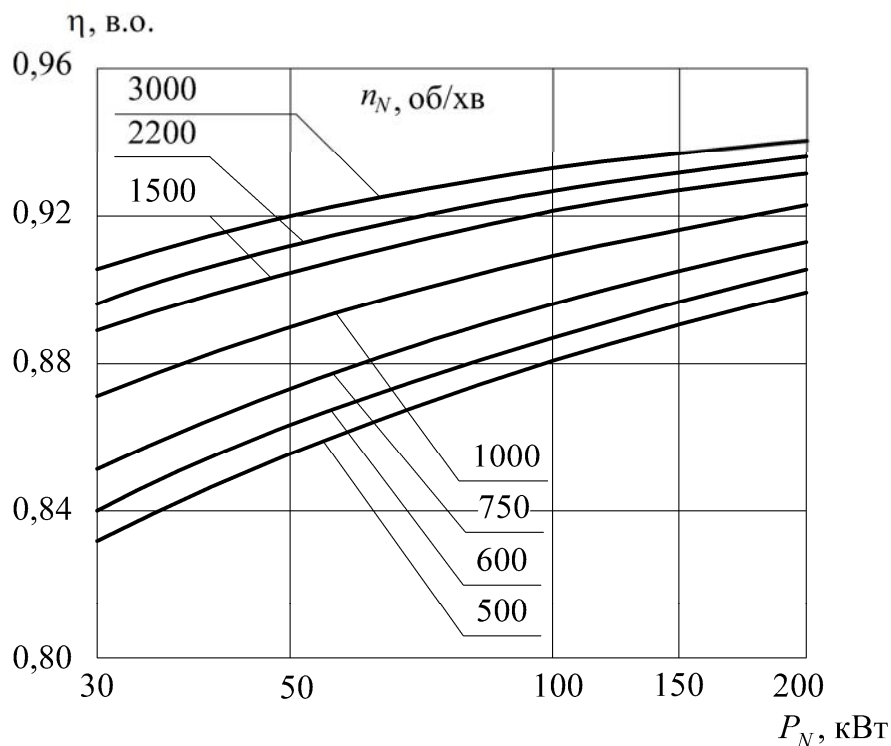


Рисунок 3.3 – До визначення ККД двигуна залежно від номінальних потужності та частоти обертання

3.4 Розрахункова довжина осердя якоря, мм,

$$l_{Fe} = \frac{6,1 \cdot 10^9 \cdot P_{calc}}{d_a^2 \cdot n_N \cdot A \cdot B_\delta \cdot \alpha_e},$$

де P_{calc} , d_a , n_N – з п. 3.3, 3.2, 2.3; A – лінійне навантаження, А/мм, – з рис. 3.4; B_δ – магнітна індукція в повітряному проміжку, Тл, – з рис. 3.5; α_e – коефіцієнт полюсної дуги з рис. 3.6.

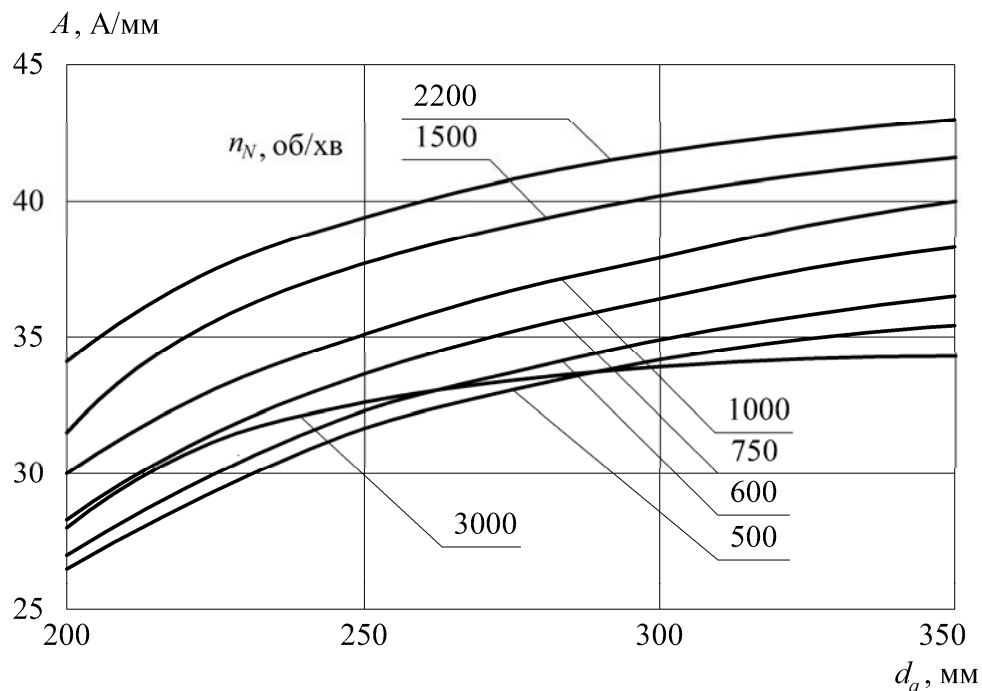


Рисунок 3.4 – До визначення лінійного навантаження двигуна залежно від діаметра якоря та номінальної частоти обертання

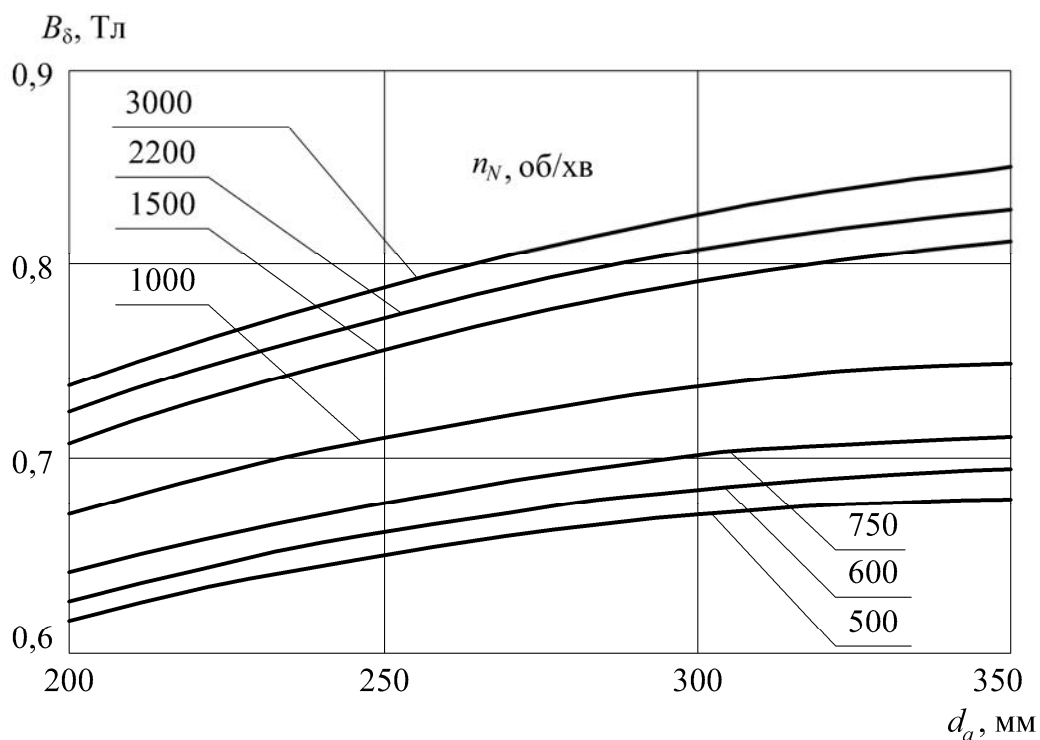


Рисунок 3.5 – До визначення магнітної індукції в повітряному проміжку залежно від діаметра якоря та номінальної частоти обертання

3.5 Відношення розрахункової довжини осердя до діаметра якоря

$$\lambda = \frac{l_{Fe}}{d_a},$$

де l_{Fe} , d_a – з п.п. 3.4; 3.2.

Величина λ не повинна перевищувати значення λ_{max} , вказане на рис. 3.7. При невиконанні умови перейти на більшу стандартну висоту осі обертання h і повторити розрахунок п.п. 3.2; 3.3.

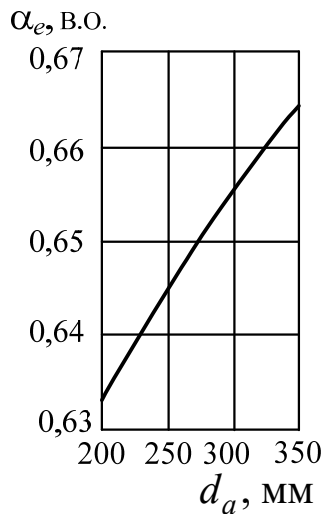


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта полюсної дуги від діаметра якоря

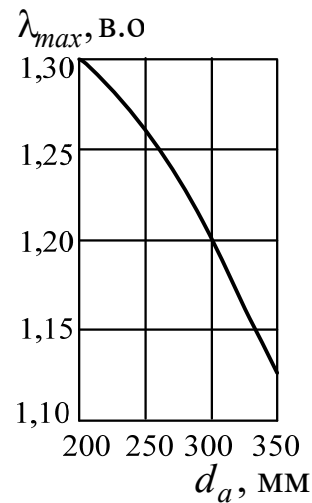


Рисунок 3.7 – Допустиме значення відношення розрахункової довжини осердя до діаметра якоря

3.6 Полісний крок, мм,

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d_a}{2p},$$

де d_a , $2p$ – з п. 3.2.

3.7 Окружна швидкість якоря, м/с,

$$v_a = \frac{\pi \cdot d_a \cdot n_N}{6 \cdot 10^4},$$

де d_a , n_N – з п.п. 3.2; 2.3.

У машинах нормального виконання $v_a \leq 40$ м/с.

3.8 Частота перемагнічування в якорі, Гц,

$$f_a = \frac{p \cdot n_N}{60},$$

де p , n_N – з п.п. 3.2; 2.3.

У машинах нормального виконання f_a знаходиться в межах від 25 Гц до 50 Гц, в швидкохідних машинах $f_a \leq 100$ Гц. Підвищене значення частоти перемагнічування призводить до збільшення магнітних втрат в сталі осердя якоря.

3.9 Вибрати систему вентиляції двигуна

При діаметрі якоря $d_a \leq 500$ мм застосовують аксіальну систему з вентилятором на валу. Кількість рядів вентиляційних отворів k_v , кількість вентиляційних отворів n_v та їхній діаметр d_v вибирається по табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри системи вентиляції двигуна

h , мм	200	225	250	280	315
k_v	1	1	1	1	2
n_v	9	11	11	13	22
d_v	14	18	24	26	23

3.10 При аксіальній системі вентиляції довжина якоря l_a приймається такою, що дорівнює розрахунковій довжині l_{Fe} (п. 3.4) з кроком заокруглення 5 мм. При цьому оновлюється і значення розрахункової довжини, $l_{Fe} = l_a$.

3.11 Ефективна довжина осердя якоря, мм,

$$l_{ef} = l_a \cdot K_{Fea},$$

де l_a – з п. 3.10, K_{Fea} – коефіцієнт заповнення сталі: для листів сталі для осердя якоря завтовшки 0,5 мм і двобічній ізоляції лаком $K_{Fea} = 0,95$.

3.12 Розрахункова ширина полюсного наконечника, мм,

$$b_{pe} = \alpha_e \cdot \tau_p,$$

де α_e , τ_p – з п.п. 3.4; 3.6.

3.13 Магнітний потік в повітряному проміжку при номінальному навантаженні машини Φ_{nom} , Вб,

$$\Phi_{nom} = B_\delta \cdot l_{Fe} \cdot b_{pe} \cdot 10^{-6},$$

де B_δ , l_{Fe} , b_{pe} – з п.п. 3.4; 3.12.

3.14 Струм при номінальному навантаженні I_N , А,

$$I_N = \frac{P_N \cdot 10^3}{\eta \cdot U_N},$$

де P_N , η , U_N – з п.п. 2.1; 3.3; 2.2.

3.15 Струм в обмотці якоря при номінальному навантаженні, А,

$I_{aN} = I_N - I_E$ – для двигунів з паралельним збудженням;

$I_{aN} = I_N$ – для двигунів з послідовним і незалежним збудженням;

де I_N – з п. 3.14.

Струм в паралельній обмотці збудження, А:

$$I_E = \frac{I_E^* \cdot I_N}{100\%},$$

де відносне значення струму у відсотках приймається з табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – До визначення струму в паралельній обмотці збудження

P_N , кВт	30	50	75	100	125	150	175	200
I_E^* , %	2,4	1,7	1,6	1,2	1,1	1,05	1,0	1,0

4 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЯКОРЯ

4.1 Вибрати тип обмотки і кількість її паралельних віток $2a$.

При струмах якоря до 600 А допускається вибір простій хвильової обмотки, від 500 до 1400 А – простої петльової або комбінованої, вище 1400 А – двоходнової петльової або комбінованої обмотки.

Відповідно кількість паралельних віток обмотки:

$2a = 2$ – при простій хвильовій обмотці;

$2a = 2p$ – при простій петльовій обмотці;

де $2p$ – з п. 3.2.

4.2 Струм в паралельній вітці обмотки, А,

$$I_{aa} = \frac{I_{aN}}{2a},$$

де I_{aN} , $2a$ – з п. 3.15, 4.1.

Для машин середньої потужності $I_{aa} \leq 400$ А.

4.3 Попереднє значення падіння напруги в обмотках якоря, додаткових полюсів і щітковому контакті, В,

$$I_{aN} R_{a\Sigma} = \frac{1 - \eta}{2} \cdot U_N,$$

де η , U_N – з п.п. 3.3; 2.2; $R_{a\Sigma}$ – сумарний опір якірного кола.

4.4 ЕРС, індукована в обмотці якоря при номінальному навантаженні, В,

$$E_{a \text{ ном}} = U_N - I_{aN} R_{a\Sigma},$$

де U_N , $I_{aN} R_{a\Sigma}$ – з п.п. 2.2, 4.3.

4.5 Орієнтовна кількість ефективних провідників обмотки якоря

$$z'_a = \frac{a \cdot E_{a \text{ ном}} \cdot 60}{p \cdot n_N \cdot \Phi_{\text{ном}}},$$

де a , $E_{a \text{ ном}}$, p , n_N , $\Phi_{\text{ном}}$ – з п.п. 4.1; 4.4: 3.2; 2.3; 3.13.

Перевірити кількість ефективних провідників, використовуючи раніше прийняте значення лінійного навантаження,

$$z'_a = \frac{\pi \cdot d_a \cdot A}{I_{aa}}.$$

Якщо різниця між орієнтовною і уточненою кількістю ефективних провідників становить більше 10 %, то на цю величину треба скоректувати $E_{a \text{ ном}}$.

4.6 Вибрати кількість витків в секції w_s обмотки якоря.

При виконанні обмотки з прямокутних провідників, враховуючи обмеження мінімальної товщини колекторних пластин, приймають w_s від 1 до 4.

З точки зору комутації цієї обмотки – для її покращення, необхідно брати мінімальну кількість витків, що сприяє зменшенню напруги між сусідніми колекторними пластинами.

Приклади конструкції одно- і двовиткових секцій петльової і хвильової обмоток якоря ДПС надано на рис. 4.1.

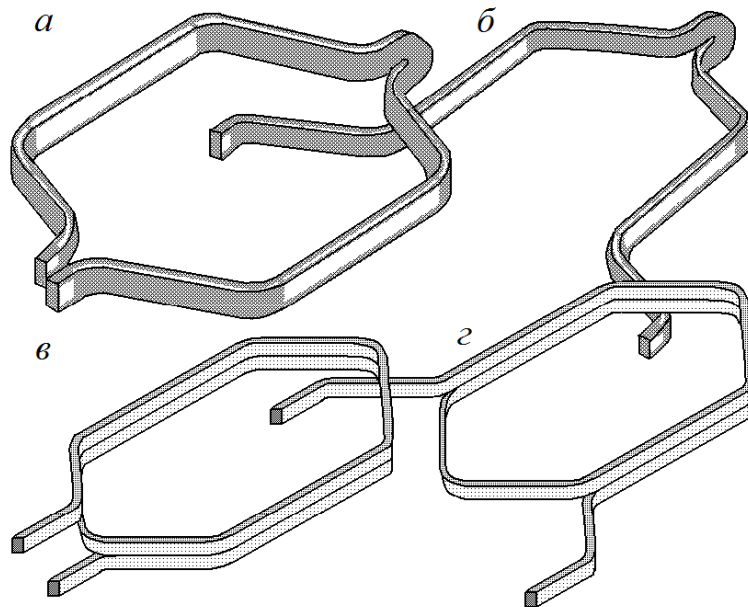


Рисунок 4.1 – Конструкції секцій обмотки якоря петльової (a , $в$) і хвильової ($б$, $г$), одновиткової (a , $б$) та двовиткової ($в$, $г$)

Досвід створення ДПС з рівнем параметрів, зазначених у вступі даного посібника, доводить, що у таких машинах, як правило, слід приймати $w_s = 1$, що разом з покращенням комутації дає простіше виконання лобових частин обмотки.

Кількість витків в секції $w_s = 2$ виходить у варіантах машин, наданих у Додатку Д, з меншими значеннями номінальної потужності P_N при номінальній напрузі $U_N = 440$ В і менших значеннях номінальної частоти обертання n_N .

4.7 Попередня кількість секцій в обмотці якоря

$$N_s = \frac{z'_a}{2 \cdot w_s},$$

де z'_a , w_s – з п.п. 4.5; 4.6.

4.8 Вибрати кількість секційних сторін по ширині паза u_n , і залежно від цього – попередню кількість пазів якоря Q_a

$$Q_a = \frac{N_s}{u_n},$$

де N_s – з п. 4.7.

Діапазони бажаної кількості пазів Q_a для прийнятої у п. 3.1 висоти осі обертання h надані в табл. 4.1. Якщо значення Q_a за п. 4.8 виходить за межі цих діапазонів, то треба повернутися до вибору значень u_n та w_s .

Таблиця 4.1 – До вибору кількості пазів якоря

h , мм	200	225	250	280	315
Q_a	18–31	21–37	24–43	27–50	29–58

Уточнені значення Q_a і u_n вибираються залежно від типу обмотки:

проста хвильова обмотка: Q_a – непарне; $u_n = 3; 5$;

проста петльова обмотка: Q_a – парне або непарне; $u_n = 2; 3; 4$.

Кількість пазів на один полюс повинна знаходитися в межах

$$\frac{Q_a}{2p} \leq 6-15 \text{ – для машин середньої потужності.}$$

Сумарний струм в пазу $I_{an\Sigma} = 2 u_n \cdot w_s \cdot I_{aa}$ повинен бути не більше, ніж 1500 А.

4.9 Визначити кількість колекторних пластин

$$K = N_s = Q_a \cdot u_n,$$

де Q_a і u_n – з п. 4.8.

4.10 Попереднє значення зовнішнього діаметра колектора, мм,

$$d_c = (0,6-0,7) \cdot d_a,$$

де d_a – з п. 3.2.

Визначений діаметр колектора округлити до найближчого нормалізованого значення: 140; 160; 180; 200; 224; 250 мм.

Перевірити розмір колекторного кроку τ_c , мм,

$$\tau_c = \frac{\pi \cdot d_c}{K},$$

де K – з п. 4.9.

У машинах загальнопромислового застосування розмір колекторного кроку τ_c лежить у межах від 3,5 мм до 10 мм.

4.11 Перевірити середню напругу між колекторними пластинами, В,

$$U_{cav} = \frac{2p \cdot U_N}{K},$$

де $2p$, U_N , K – з п.п. 3.2; 2.2; 4.9.

Повинно бути $U_{cav} \leq 20$ В – для машин середньої потужності.

Якщо умови п.п. 4.10 і 4.11 виконуються, то можна розрахунок продовжувати далі. Якщо τ_c і U_{cav} виходять за межі рекомендованих значень, необхідно перейти до іншого типу обмотки, при якому значення τ_c і U_{cav} будуть у допустимих межах. Типом обмотки рекомендується задаватися в порядку, вказаному в п. 4.1.

4.12 Перевірити виконання умов симетрії обмотки:

$$\frac{K}{a} - \text{ціле число}; \quad \frac{2p}{a} - \text{ціле число};$$

$$\frac{Q_a}{a} - \text{ціле число}; \quad \frac{K}{Q_a} - \text{ціле число},$$

де K , Q_a , $2p$, a – з п.п. 4.9; 4.8; 3.2; 4.1.

У разі невиконання умов симетрії необхідно змінити кількість пазів якоря Q_a (п. 4.8).

При остаточному виборі кількості пазів якоря Q_a слід прагнути, щоб було:

$$\frac{Q_a}{2p} \pm \varepsilon_n = \text{ціле число}; \quad \varepsilon_n = \frac{1}{2p} \text{ – для хвильових обмоток};$$

$$\frac{Q_a}{2p} \pm \varepsilon_n = \text{ціле число}; \quad \varepsilon_n = 0,5 \text{ – для петльових обмоток}.$$

Отримані в цьому пункті значення величин Q_a і K вважати остаточними.

Відповідно до цих значень перерахувати N_s (п. 4.7); τ_c (п. 4.10); U_{cav} (п. 4.11).

4.13 Уточнити кількість ефективних провідників обмотки якоря

$$z_a = 2 \cdot w_s \cdot u_n \cdot Q_a,$$

де w_s , u_n , Q_a – з п.п. 4.6; 4.8; 4.12.

4.14 Перевірити значення величин Φ_{nom} , B_δ , A і порівняти з прийнятими в п.п. 3.13; 3.4 (допустиме відхилення повинно складати не більше 10 %)

$$\Phi_{nom} = \frac{a \cdot E_{anot} \cdot 60}{p \cdot n_N \cdot z_a}; \quad B_\delta = \frac{\Phi_{nom} \cdot 10^6}{l_{Fe} \cdot b_{pe}}; \quad A = \frac{z_a \cdot I_{aa}}{\pi \cdot d_a},$$

де a , E_{anot} , p , n_N , z_a , l_{Fe} , b_{pe} , I_{aa} , d_a – з п.п. 4.1; 4.4; 3.2; 2.3; 4.13; 3.4; 3.12; 4.2; 3.2.

4.15 Крок обмотки якоря по реальних пазах

$$y_Q = \frac{Q_a}{2p} \pm \varepsilon_n,$$

де Q_a , $2p$, ε_n – з п.п. 4.8, 3.2, 4.12.

З метою економії міді слід приймати $(-\varepsilon_n)$.

4.16 Результуючий крок обмотки по елементарних пазах:

$$y_{Q\Sigma} = \pm 1 \text{ – для простої петльової обмотки};$$

$$y_{Q\Sigma} = \frac{N_s \pm 1}{p} \text{ – для простої хвильової обмотки};$$

де N_s , p – з п.п. 4.9; 3.2.

Щоб уникнути перехрещення в лобових частинах з боку колектора, необхідно брати знак « $-$ » для хвильових обмоток, знак « $+$ » для петльових обмоток.

4.17 Перший частковий крок обмотки якоря

$$y_{Q1} = \frac{N_s}{2p} - \varepsilon_k,$$

де $\varepsilon_k = u_n \cdot \varepsilon_n$ – укорочення кроку по колектору;

$N_s, p, \varepsilon_n, u_n$ – з п.п. 4.7; 3.2; 4.12; 4.8.

4.18 Другий частковий крок обмотки якоря:

$$y_{Q2} = y_{Q1} - y_{Q\Sigma} \text{ – для петльових обмоток;}$$

$$y_{Q2} = y_{Q\Sigma} - y_{Q1} \text{ – для хвильових обмоток,}$$

де $y_{Q\Sigma}, y_{Q1}$ – з п.п. 4.16. 4.17.

4.19 Крок зрівняльних з'єднань y_c і їх кількість n_{eq} у разі застосування петльової обмотки

$$y_c = n_{eq} = \frac{K}{a}.$$

де K, a – з п.п. 4.12; 4.1.

У машинах середньої потужності зазвичай повну кількість зрівняльних з'єднань зменшують в u_n разів (п. 4.8).

4.20 Зобразити схему-розгортку обмотки якоря. Фрагменти петльової та хвильової схем обмотки якоря з одновитковими секціями надані на рис. 4.2.

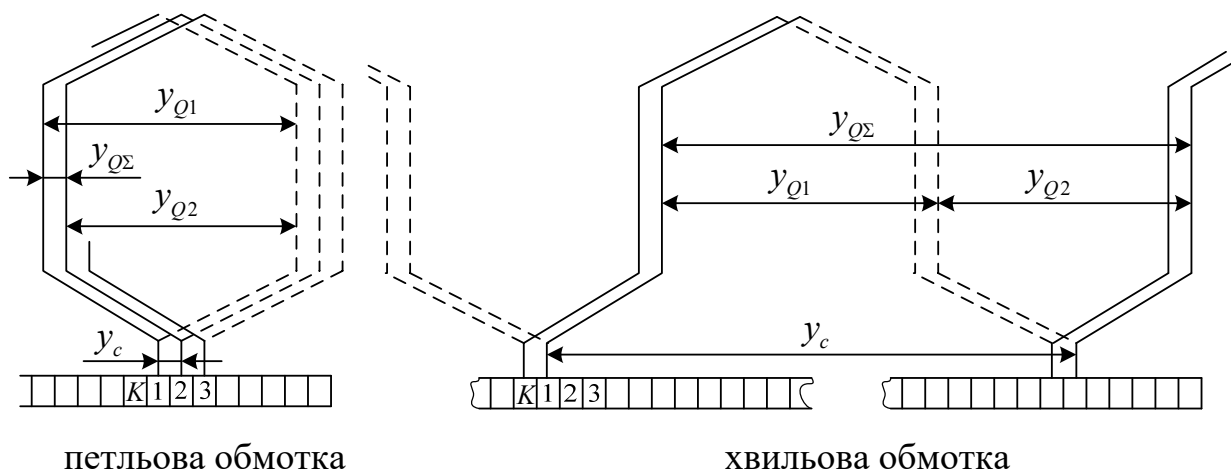


Рисунок 4.2 – Фрагменти петльової та хвильової схем обмотки якоря

Розгорнути повні схеми простих петльової та хвильової обмоток надано у додатку Е на рис. Е.1 і Е.2.

5 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ПАЗА І ЗУБЦЯ

5.1 Зубцевий крок на поверхні якоря, мм,

$$\tau_a = \frac{\pi \cdot d_a}{Q_a},$$

де d_a, Q_a – з п.п. 3.2; 4.12.

Для машин загальнопромислового призначення зубцевий крок τ_a знаходиться у межах від 18 мм до 35 мм.

5.2 Вибрати за рис. 5.1 попереднє значення висоти паза h_{na} , яка остаточно визначиться після вибору розмірів провідників, їхньої ізоляції та розташування в пазу.

Розміри зубця і паза осердя якоря позначено на рис. 5.2.

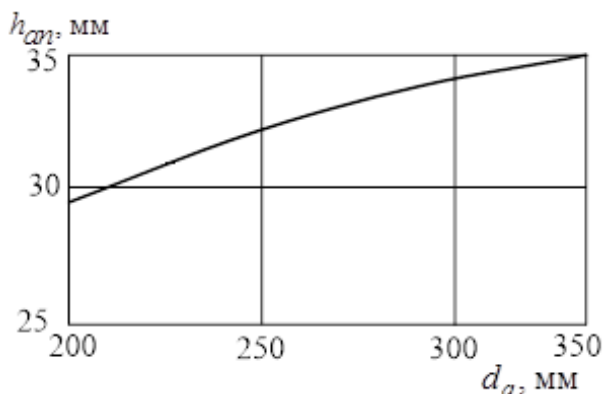


Рисунок 5.1 – До вибору висоти паза якоря залежно від діаметра якоря

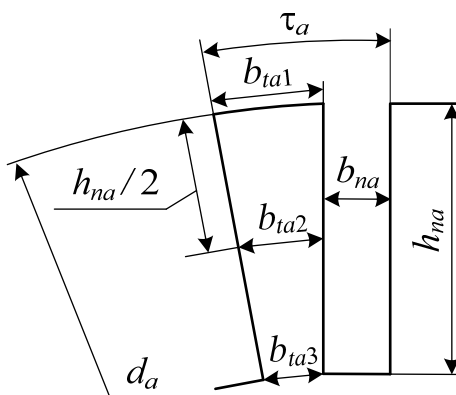


Рисунок 5.2 – Розміри зубця і паза осердя якоря

5.3 Крок зубця біля основи, мм,

$$\tau_{ta3} = \pi \cdot \frac{(d_a - 2h_{na})}{Q_a},$$

де d_a , h_{na} , Q_a – з п.п. 3.2; 5.2; 4.12.

5.4 Мінімально допустима ширина зубця біля основи, мм,

$$b_{ta3} = \frac{B_\delta \cdot \tau_a \cdot l_{Fe}}{B_{ta3} \cdot l_{ef}},$$

де B_{δ} , τ_a , l_{Fe} , l_{ef} – з п.п. 3.4; 5.1; 3.4; 3.11; B_{ta3} – розрахункова магнітна індукція біля основи зубця (вибирається з табл. 5.1, де f_a з п. 3.8).

Таблиця 5.1 – Розрахункова магнітна індукція біля основи зубця якоря

f_a , Гц	100	75	50	25
B_{ta3} , Тл	2,0	2,1	2,2	2,3

5.5 Попередня ширина паза, мм,

$$b_{na} = \tau_{ta3} - b_{ta3},$$

де τ_{ta3} , b_{ta3} – з п.п. 5.3; 5.4.

5.6 Вибрати допустиму густину струму в обмотці якоря.

Для машин загальнопромислового застосування рекомендується густина струму $J_{wa} = 4,5 - 6,0$ А/мм². Нижня межа відноситься до тихохідних машин. Залежно від системи вентиляції та її інтенсивності густина струму може відхилятися від вказаного діапазону на 10–15 %.

5.7 Розрахункова площа перерізу ефективного провідника обмотки, мм²,

$$S'_{ca} = \frac{I_{aa}}{J_{wa}},$$

де I_{aa} , J_{wa} – з п.п. 4.2; 5.6.

5.8. Кількість ефективних провідників в одному пазу

$$z_{Qa} = 2 \cdot u_n \cdot w_s,$$

де u_n , w_s – з п.п. 4.8; 4.6.

У машинах загальнопромислового призначення при $d_a > 200$ мм зазвичай застосовують відкриті пази прямокутної форми, з «жорсткою» двошаровою обмоткою, секції якої виконуються з прямокутних провідників. У такій обмотці провідники секції різних полюсних кроків в пазу розташовуються в різних шарах – один над одним. Провідники сусідніх секцій лежать поруч в спільному шарі.

Приклад конструкцій котушок петльової та хвильової обмотки якоря наведено на рис. 5.3. Котушки складаються з трьох одновиткових секцій, тобто вони мають параметри $w_s = 1$, $u_n = 3$, обмотка двошарова, тому один бік котушки розташовується у верхньому шарі паза, другий бік – у нижньому шарі іншого паза.

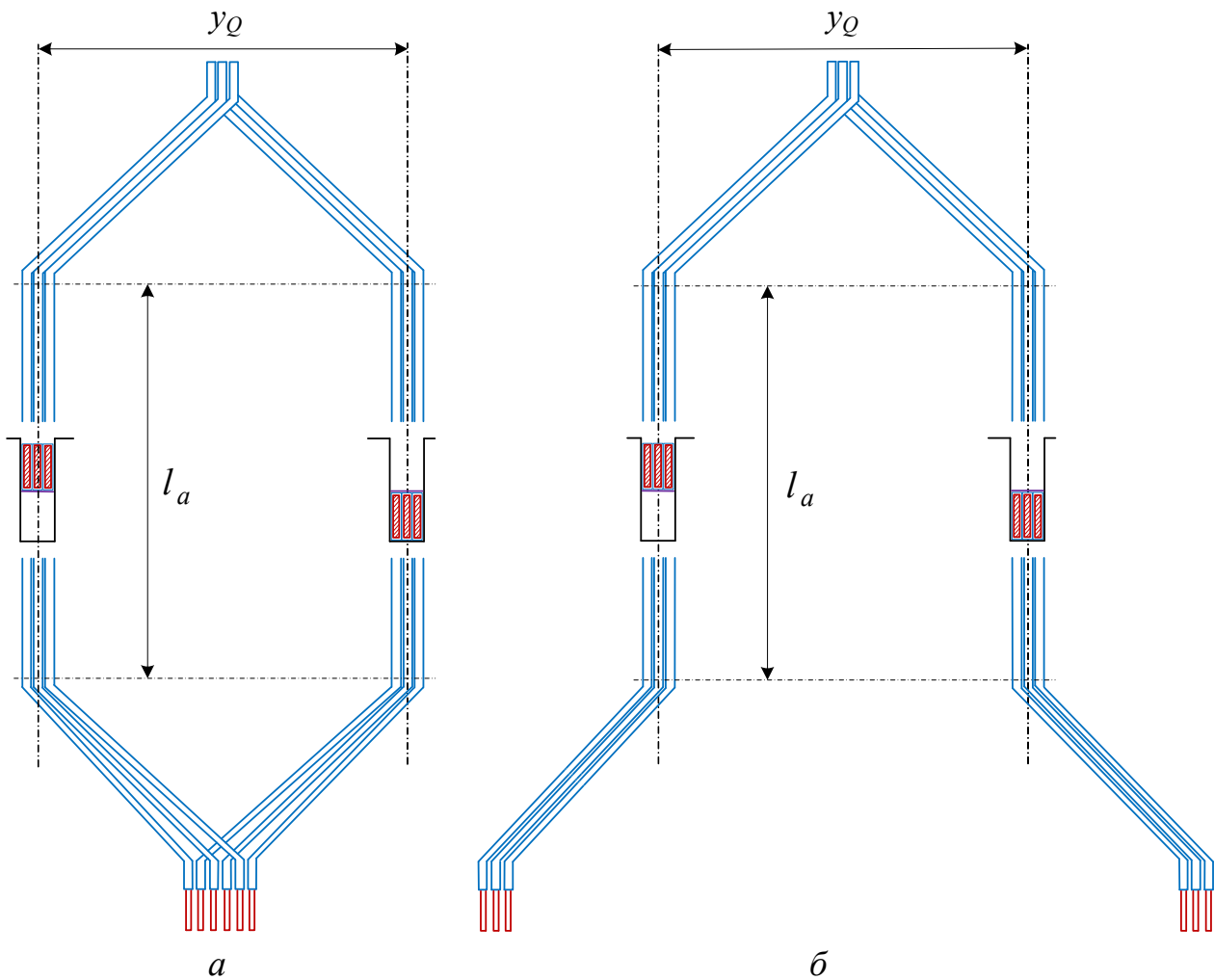


Рисунок 5.3 – Конструкції котушок *a* – петльової та *б* – хвильової обмотки якоря, які складаються з трьох одновиткових секцій, та їх розташування в пазах осердя

5.9 За розрахунковою площею перерізу S'_{ca} (п. 5.7) з табл. А.1 вибрати найближче фактичне значення площі поперечного перерізу ефективного провідника S_{ca} без ізоляції і відповідні його розміри $a_a \times b_a$ (a_a , b_a – менший і більший боки).

Вибрана висота провідника b_a не повинна перевищувати значення, які наведено в табл. 5.2 (де f_a з п. 3.8) за умовою обмеження втрат на вихрові струми.

Таблиця 5.2 – Бажані межі розміру більшого боку провідника в пазу якоря

f_a , Гц	15	25	40	50	60	75
b_a , мм	22,6	19,5	15,6	12,5	10	7,6

Якщо обмеження за табл. 5.2 перевищується, то ефективні провідники необхідно розділити по висоті на u_{be} елементарних (наприклад, на два: $u_{be} = 2$, якщо розділення непотрібно, то $u_{be} = 1$) з розрахунковою площею перерізу

$$S'_{cae} = S'_{ca} / u_{be},$$

де S'_{ca} – з п. 5.7.

При відсутності розділення провідника по висоті $u_{be} = 1$, і тоді розміри елементарного провідника і площа його поперечного перерізу залишаються такими, як і у ефективного:

$$a_{ae} = a_a; b_{ae} = b_a; S'_{cae} = S'_{ca}.$$

У випадку, коли провідник по висоті розділяється, тоді за розрахунковою площею перерізу S'_{cae} треба вибрати з табл. А.1 найближчу за значенням фактичну площу перерізу елементарного провідника без ізоляції S_{cae} і відповідні стандартні розміри елементарного провідника без ізоляції $a_{ae} \times b_{ae}$ (a_{ae} – менший бік, b_{ae} – більший бік).

З урахуванням зазначеного з табл. А.2 визначити розміри двобічної ізоляції елементарного провідника по ширині і висоті: Δa_{is} ; Δb_{is} , а також розрахувати його розміри і площу перерізу в ізоляції:

$$a_{aise} = a_{ae} + \Delta a_{is}; b_{aise} = b_{ae} + \Delta b_{is}; S_{wae} = a_{aise} \cdot b_{aise}.$$

При не розділенні або розділенні ефективних провідників по висоті на u_{be} елементарних визначаються розміри ізольованих ефективних провідників:

$$a_{ais} = a_{aise}; b_{ais} = u_{be} \cdot b_{aise},$$

а також визначаються фактичні площі перерізу ефективного провідника без ізоляції та з ізоляцією

$$S_{ca} = u_{be} S_{cae}; S_{wa} = u_{be} S_{wae}.$$

5.10 Створити кресленик заповнення паза провідниками і ізоляцією з урахуванням розміщення провідників в пазу та класу нагрівостійкості ізоляції.

Приклади заповнення паза наведені на рис. 5.3 і деталізовані в табл. 5.3.

На рис. 5.4 в пазу показано по два елементарні провідники, на які розділені ефективні провідники. Якщо секцій мають більше ніж один віток, то слід зобразити перерізи кожного – також один над одним, як на рис. 4.1, в, г.

Кріплення обмотки якоря в пазах бандажем (рис. 5.4, а) практикується в ДПС з діаметром якоря $d_a = (220 - 330)$ мм при окружній швидкості v_a (п. 3.7) до

25 м/с; при більших значеннях v_a застосовується кріплення обмотки клином (рис. 5.3, б). Заповнення паза на рис. 5.4 є прикладом при $w_s = 2$, $u_n = 3$, $u_{be} = 1$.

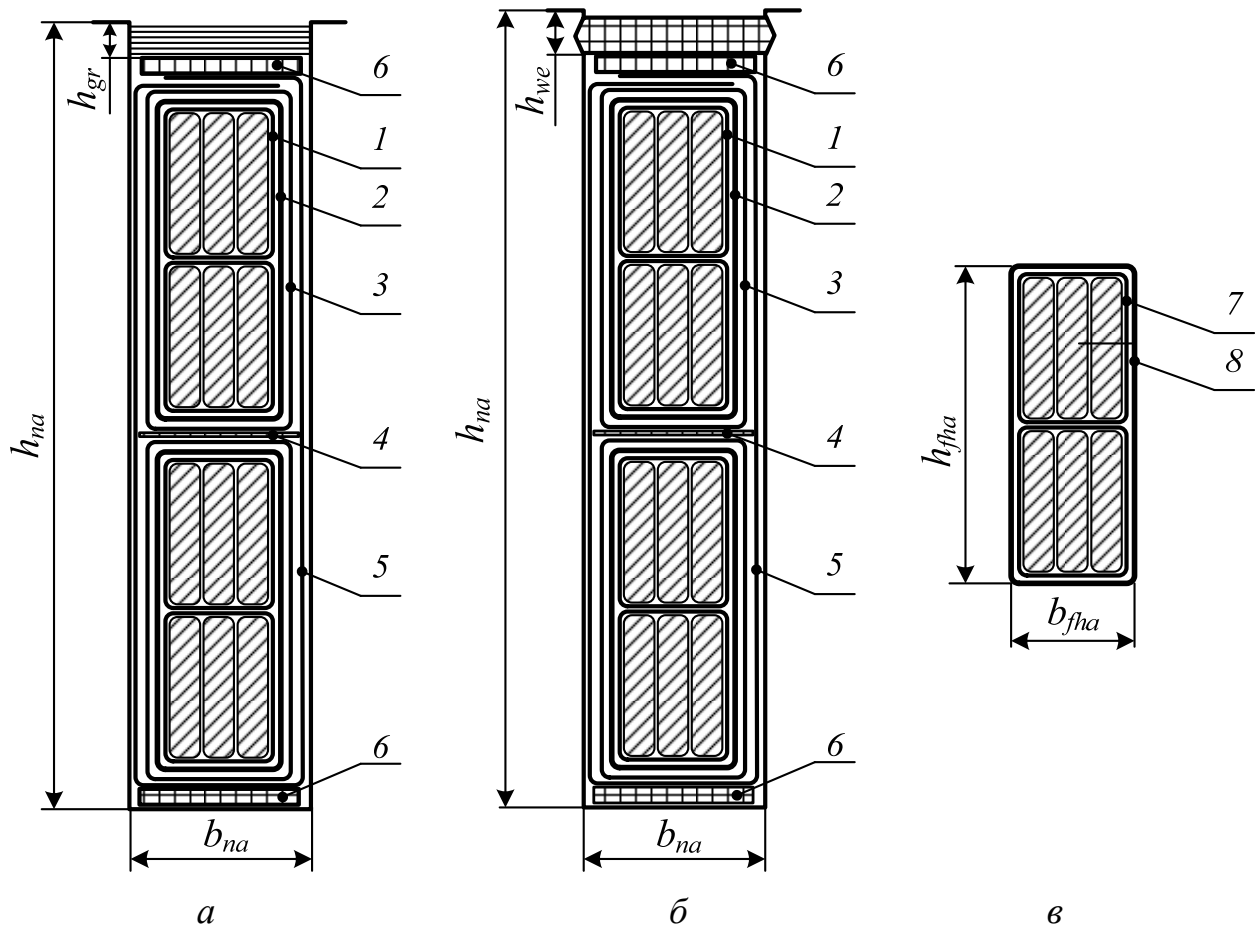


Рисунок 5.4 – Заповнення паза якоря при кріпленні обмотки бандажем (а), клином (б) та переріз одного шару лобової частини (в)

5.11 Уточнити остаточні розміри паза, мм,

$$h_{na} = u_a \cdot b_{ais} + h_{is} + h_{cra} + \Delta h;$$

$$b_{na} = u_n \cdot a_{ais} + b_{is} + \Delta b,$$

де $u_a = 2w_s$ – кількість ефективних провідників по висоті паза (з кресленника); u_n , a_{ais} , b_{ais} – з п.п. 4.8; 5.9; h_{is} , b_{is} – сумарна товщина ізоляції по висоті та ширині паза (з кресленника за табл. 5.3); $h_{cra} = h_{gr} = 3$ мм – при кріпленні обмотки бандажем (це глибина бандажної канавки на рис. 5.4, а); $h_{cra} = h_{we} = 3,5$ мм – при кріпленні обмотки клином (рис. 5.4, б); $\Delta h = 0,2$ мм, $\Delta b = 0,3 - 0,5$ мм – допуски на штампування.

Таблиця 5.3 – Ізоляція обмотки якоря

Частина обмотки	Паз на рис. 5.3	Матеріал, марка ізоляції класу F	Товщина, мм	Кількість шарів	Двобічна товщина ізоляції			
					По ширині	По висоті при w_s		
						1	2	
Пазова	1	Плівка ПЕТ – Е 25×20	0,025	1 шар з перекриттям в $\frac{1}{2}$ ширини	0,1	0,2	0,4	
	2	Стрічка слюдяна просочена ЛСПМ-0,11	0,11	2 та $\frac{1}{4}$ оберту	0,55	0,88	0,88	
	3	Стрічка скляна ЛЕС 0,1×20	0,1	1 шар у стик	0,2	0,4	0,4	
	4	Склолакотка-нина ЛСК 155/180	0,2	1	–	0,2	0,2	
	5			1	0,4	0,6	0,6	
	6	Склотекстоліт СТЕФ – І	0,5	1	–	1	1	
	Допуск на укладання обмотки					0,3	0,5	0,5
	Загальна товщина ізоляції в пазу (без виткової ізоляції та висоти бандажу або клина) b_{is} , h_{is}					1,55	3,78	3,98
Лобова	7	Плівка ПЕТ – Е 25×20	0,025	1 шар з перекриттям в $\frac{1}{2}$ ширини	0,1	0,2	0,4	
	8	Стрічка скляна ЛЕС 0,1×20	0,1		0,2	0,4	0,4	
	9	Загальна товщина ізоляції лобової частини (без виткової ізоляції) b_{savis}			0,3	0,6	0,8	
Примітка: поз. 5 застосовується при напрузі якоря 440 В.								

Розміри лобової частини обмотки (висота і ширина на рис. 5.3, в), мм,

$$h_{fha} = b_{ais} + 0,6; \quad b_{fha} = u_n \cdot a_{ais} + 0,3,$$

де u_n , a_{ais} , b_{ais} – з п.п. 4.8; 5.9.

5.12 Коефіцієнт заповнення паза

$$K_{Qa} = \frac{z_{Qa} \cdot S_{wa}}{b_{na} \cdot h_{na}},$$

де z_{Qa} , S_{wa} , b_{na} , h_{na} – з п.п. 5.8; 5.9; 5.11.

При прямокутних провідниках обмотки якоря коефіцієнт заповнення паза знаходиться у межах від 0,4 до 0,7.

5.13 Перевірити крок зубця біля його основи τ_{ta3} і ширину зубця b_{ta3} та порівняти з набутих значень в п.п. 5.3; 5.4 (допустиме відхилення має бути не більше 10 %),

$$\tau_{ta3} = \pi \cdot \frac{(d_a - 2 \cdot h_{na})}{Q_a}; \quad b_{ta3} = \tau_{ta3} - b_{na},$$

де d_a , h_{na} , Q_a , b_{na} – з п.п. 3.2; 5.11; 4.12.

5.14 Перевірити розрахункову магнітну індукцію біля основи зубця, Тл,

$$B_{ta3} = B_{\delta} \cdot \frac{\tau_a \cdot l_{Fe}}{b_{ta3} \cdot l_{ef}},$$

де B_{δ} , τ_a , l_{Fe} , b_{ta3} , l_{ef} – з п.п. 4.14; 5.1; 3.4; 5.13; 3.11.

Якщо B_{ta3} відповідає прийнятому в п. 5.4, то прийняті розміри вважати остаточними.

5.15 Зубцевий крок якоря і ширина зубця в середньому перерізі, мм,

$$\tau_{ta2} = \pi \cdot \frac{(d_a - h_{na})}{Q_a}; \quad b_{ta2} = \tau_{ta2} - b_{na},$$

де d_a , h_{na} , Q_a , b_{na} – з п.п. 3.2; 5.11; 4.12.

5.16 Ширина зубця на поверхні якоря, мм,

$$b_{ta1} = \tau_a - b_{na},$$

де τ_a , b_{na} – з п.п. 5.1; 5.11.

5.17 Довжина вильоту однієї лобової частини обмотки якоря, мм,

$$l_{fha} = 0,3 \cdot \tau_{ta2} \cdot y_Q + \frac{h_{na}}{2} + 20,$$

де τ_{ta2} , y_Q , h_{na} – з п.п. 5.15; 4.15; 5.11.

5.18 Середня довжина однієї лобової частини обмотки якоря, мм,

$$l_{fhav} = 1,2 \cdot \tau_{ta2} \cdot y_Q + h_{na} + 40,$$

де τ_{ta2} , y_Q , h_{na} – з п.п. 5.15; 4.15; 5.11.

5.19 Середня довжина витка обмотки якоря, мм (приклад позначень розмірів для петльової та хвильової обмоток надано на рис. 5.5),

$$l_{Wav} = 2 \cdot (l_a + l_{fhav}),$$

де l_a , l_{fhav} – з п.п. 3.10; 5.18.

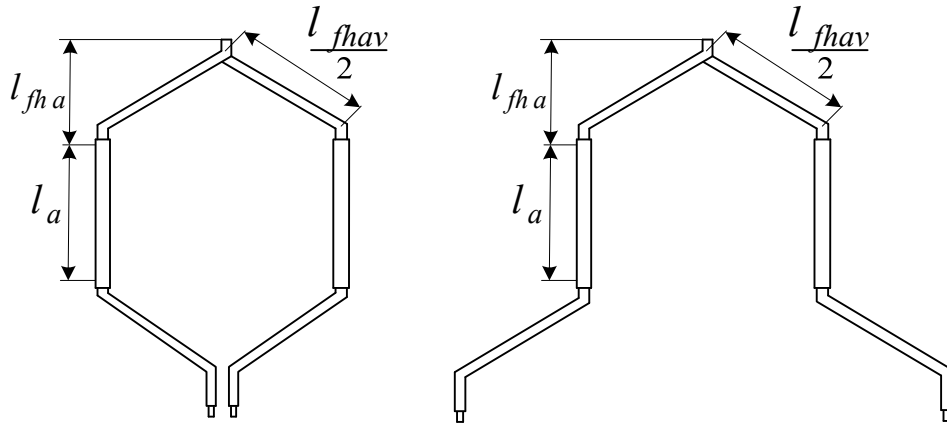


Рисунок 5.5 – Позначення розмірів секцій петльової та хвильової обмоток

5.20 Опір обмотки якоря при розрахунковій температурі 115°C для класу ізоляції F, Ом,

$$R_a = \frac{1,38 \cdot \rho_{Cu} \cdot z_a \cdot (l_a + l_{fhav}) \cdot 10^{-3}}{(2a)^2 \cdot S_{ca}},$$

де z_a , $2a$, l_a , l_{fhav} , S_{ca} – з п.п. 4.13, 4.1; 3.10; 5.18; 5.9;

$\rho_{Cu} = 17,5 \cdot 10^{-3}$ (Ом·мм²)/м – питомий електричний опір міді при температурі 20°C.

5.21 Падіння напруги в обмотці якоря $I_{aN}R_a$, В,

де I_{aN} , R_a – з п.п. 3.15; 5.20.

5.22 Перевірити попереднє значення падіння напруги в електричному колі якоря, В,

$I_{aN}R_{a\Sigma} = I_{aN}R_a + I_{aN}R_{ad} + 2\Delta U_b$ – при паралельному і незалежному збудженні;

$I_{aN}R_{a\Sigma} = I_{aN}R_a + I_{aN}R_{Es} + I_{aN}R_{ad} + 2\Delta U_b$ – при послідовному збудженні,

де $I_{aN}R_a$ – з п.п. 5.21;

$I_{aN}R_{Es} = 0,15 \cdot (I_{aN}R_a)$ – падіння напруги в послідовній обмотці;

$I_{aN}R_{ad} = 0,33 \cdot (I_{aN}R_a)$ – падіння напруги в обмотці додаткових полюсів;

$\Delta U_b = 1,0-1,5$ В – падіння напруги в щітковому контакті для електрографітованих щіток залежно від їхньої марки.

Якщо отримане значення відрізняється від раніше прийнятого (п. 4.3), то необхідно перерахувати п.п. 4.4–4.14.

5.23 Висота спинки якоря конструктивна, мм,

$$h_{ya} = \frac{\Phi_{nom} \cdot 10^6}{2 \cdot B_{ya} \cdot l_{ef}} + \frac{2}{3} d_v \cdot k_v,$$

де Φ_{nom} , l_{ef} , d_v , k_v – з пп. 4.14; 3.11; 3.9; B_{ya} – магнітна індукція в спинці якоря, вибрати з табл. 5.4 (де f_a з п. 3.8).

Таблиця 5.4 – Рекомендовані значення магнітної індукції в спинці осердя якоря

f_a , Гц	75	50	25	15
B_{ya} , Тл	0,8–0,9	1,0–1,2	1,3–1,4	1,4–1,65

5.24 Внутрішній діаметр осердя якоря, мм,

$$d_{ai} = d_a - 2 \cdot h_{na} - 2 \cdot h_{ya},$$

де d_a , h_{na} , h_{ya} – з пп. 3.2; 5.11; 5.23.

Отримане значення діаметра d_{ai} уточнюється відповідно стандартних значень, наведених в табл. 5.5, що використовуються у реальних двигунах серії 4П.

Таблиця 5.5 – До вибору внутрішнього діаметра осердя якоря

Висота осі обертання, мм	200	225	250	280	315
d_{ai} , мм	65	75	85	95	100

5.25 З урахуванням прийнятого стандартного значення діаметра d_{ai} перераховується висота спинки осердя якоря (через перетворення формули з п. 5.24):

$$h_{ya} = 0,5(d_a - 2 \cdot h_{na} - d_{ai}).$$

6 РОЗРАХУНОК КОЛЕКТОРА ТА ВИБІР ЩІТОК

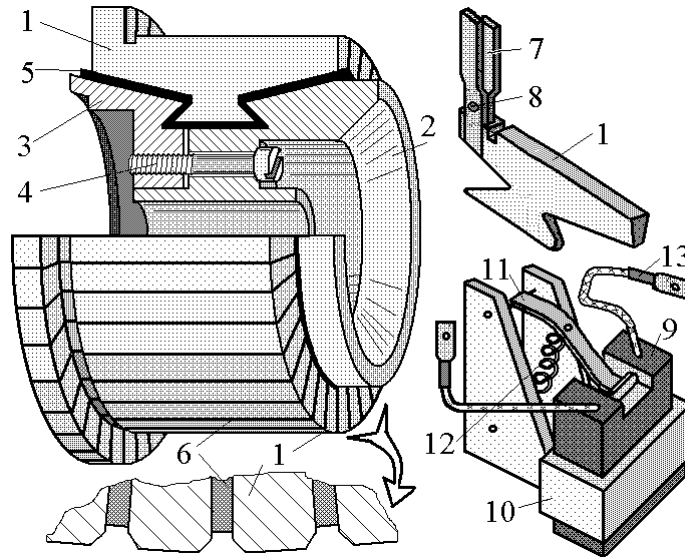
6.1 Будова колектора та щітки з елементами її утримання показані на рис. 6.1.

Уточнити зовнішній діаметр колектора. Для цього виконати перевірку виконання умови:

$$d_c \leq d_a - 2h_{na},$$

де d_a , h_{na} з пп. 3.2; 5.11.

Якщо умова виконується, тоді діаметр колектора залишається незмінним, в іншому випадку треба зменшити висоту паза якоря та повторити розрахунок.



1 – колекторна пластина; 2 – корпус колектора; 3 – натискний фланець;
 4 – гвинт; 5, 6 – ізоляційні прокладки; 7 – півник (виступна частина колекторної
 пластини); 8 – заклепка; 9 – щітка; 10 – щіткотримач; 11 – натискний палець;
 12 – пружина; 13 – провідниковий канатик

Рисунок 6.1 – Елементи конструкції щітково-колекторного вузла

6.2 Окружна швидкість колектора, м/с,

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_c \cdot n_N}{6 \cdot 10^4},$$

де d_c , n_N – з п.п. 6.1; 2.3.

Ця величина не повинна перевищувати 30 м/с, $v_c \leq 30$ м/с.

6.3 Колекторний крок, мм,

$$\tau_c = \frac{\pi \cdot d_c}{K},$$

де d_c , K – з п.п. 6.1; 4.12.

6.4 Товщина колекторної пластини, мм,

$$b_c = \tau_c - b_{cis},$$

де τ_c – з п. 6.3; b_{cis} – товщина ізоляційної пластини, для колекторів середнього діаметра $b_{cis} = 0,8$ мм.

6.5 Вибрати кількість комплектів щіток

Звичайно кількість комплектів щіток приймається рівною кількості полюсів машини.

6.6 Струм, що протікає через щітки одного бракета, А,

$$I_{br} = \frac{I_{aN}}{p},$$

де I_{aN} , p – з п.п. 3.15; 3.2.

6.7 Попередньо ширина щітки

$$b'_b = \tau_c \cdot \tau_{bc},$$

де τ_{bc} – перекриття щітки, $\tau_{bc} = u_n + 0,5$; τ_c , u_n – з п.п. 6.3, 4.8.

За ДСТУ ІЕС 60136 (табл. 6.1) вибрати по значенню b'_b марку та розміри щітки $b_b \times l_b$, густину струму в контактi щіток J_b , перехідне падіння напруги на пару щіток $2\Delta U_b$.

Таблиця 6.1 – Параметри елементів щітково-колекторного ковзного контакту

Марка щітки	Перехідне падіння напруги на пару щіток, В	Густина струму, А/мм ²	Окружна швидкість колектора, м/с	Тиск на щітку, кПа	Розміри щітки $b_b \times l_b$, мм×мм
ЕГ2А	3,6	0,10	45	20–25	10×(25; 32; 40; 50)
ЕГ2АФ	2,2	0,15	90	15–21	12,5×(25; 32; 40; 50; 64)
ЕГ4	2,0	0,12	40	15–20	12,5×(25; 32; 40; 50; 64)
ЕГ8	2,4	0,10	40	20–40	16×(32; 40; 50; 64)
ЕГ14	2,5	0,11	40	20–40	20×(32; 40; 64)
ЕГ61	3,0	0,13	60	35–50	25×(40; 50; 64)

6.8 Попередньо площа контакту одного комплекту щіток, мм²,

$$S'_b = \frac{I_{br}}{J_b},$$

де I_{br} , J_b – з п.п. 6.6; 6.7.

6.9 Вибрати кількість щіток одного бракета і округлити до цілого числа

$$n_b = \frac{S'_b}{b_b \cdot l_b},$$

де S'_b , b_b , l_b – з п.п. 6.8; 6.7.

За умови надійної роботи щіткових контактiв бажано прийняти кількість щіток $n_b \geq 2$.

6.10 Перевірити площу контакту одного комплекту щіток, мм²,

$$S_b = n_b \cdot b_b \cdot l_b$$

та середнє значення густини струму в контактї щіток, А/мм²,

$$J_b = \frac{I_{br}}{S_b},$$

де I_{br} , b_b , l_b , n_b – з п.п. 6.6; 6.7; 6.9.

Якщо значення J_b не збігається з вибраним в п. 6.7, то перейти до інших розмірів або іншої марки щіток і перерахувати п.п. 6.7–6.10.

6.11 Площа контакту усіх комплектів щіток, мм²,

$$S_{b\Sigma} = 2p \cdot n_b \cdot b_b \cdot l_b,$$

де $2p$, b_b , l_b , n_b – з п.п. 3.2; 6.7; 6.9.

6.12 Корисна довжина колектора (рис. 6.2), мм,

$$l_c = n_b \cdot l_b + (n_b - 1) \cdot l_{c3} + l_{c1} + l_{c2},$$

де n_b , l_b – з п.п. 6.9; 6.7; $l_{c1} = 8-15$ мм – відстань між краєм колектора і найближчою щіткою; $l_{c2} = (10-15)$ мм – відстань між півником (виступною частиною колекторної пластини) і найближчою щіткою; $l_{c3} = 5$ мм – відстань між сусідніми щітками.

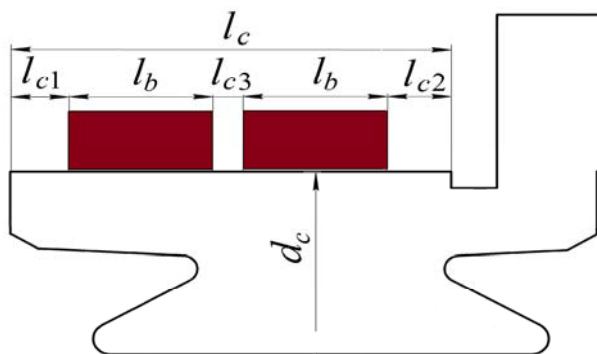


Рисунок 6.2 – Розміри робочої поверхні колектора

6.13 Переріз зрівняльних з'єднань (тільки для петльової обмотки), мм²,

$$S_{ceq} = (0,2 - 0,3) \cdot S_{ca},$$

де S_{ca} – з п. 5.9.

7 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ОСЕРДЬ ГОЛОВНИХ ПОЛЮСІВ ТА СТАНИНИ

7.1 Довжина повітряного проміжку δ під головним полюсом на його осі вибирається з рис. 7.1. Вибране значення δ округлити з кроком 0,1 мм.

Для машин загальнопромислового призначення зазвичай застосовується полюсний наконечник ексцентричної форми. Лист головного полюса з ексцентричною формою полюсного наконечника показаний на рис. 7.2.

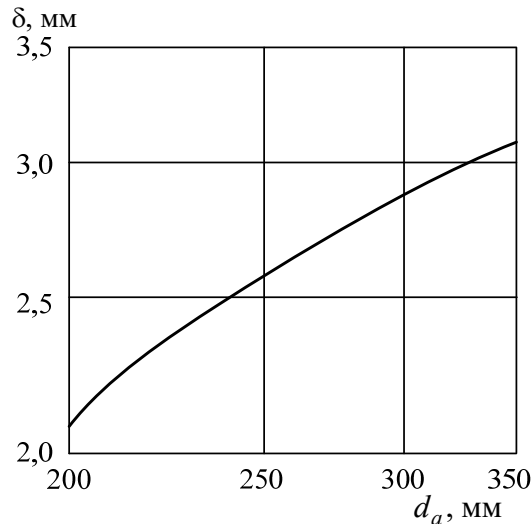


Рисунок 7.1 – До визначення довжини повітряного проміжку під головним полюсом

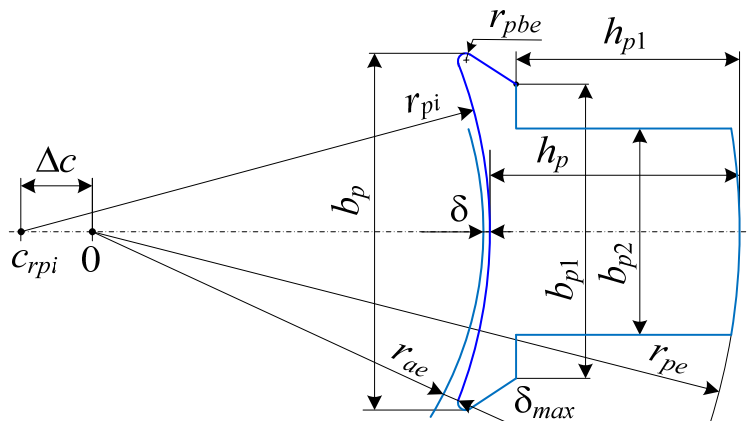


Рисунок 7.2 – Геометрія осердя головного полюса з ексцентричною формою полюсного наконечника

Для утворення ексцентриситету радіус внутрішньої поверхні осердя полюса r_{pi} починається з центра c_{rpi} , який зсунутий на Δc від точки 0 на центральній осі якоря, з якої починаються радіуси зовнішньої поверхні осердя якоря r_{ae} і верхньої частини осердя полюса r_{pe} .

Відповідно повітряний проміжок буде нерівномірним. Під серединою головного полюса він має розмір δ , а довжина повітряного проміжку під краєм полюса буде більше ніж на осі головного полюса. Вона визначається як

$$\delta_{max} = 3 \cdot \delta.$$

Розмір еквівалентного повітряного проміжку δ_{eq} , мм, який використовується в розрахунку МРС магнітного кола двигуна, визначається як

$$\delta_{eq} = 0,75 \cdot \delta + 0,25 \cdot \delta_{max}.$$

7.2 Конструктивна ширина полюсного наконечника, мм,

$$b_p = b_{pe},$$

де b_{pe} – з п. 3.12.

7.3 Коефіцієнт магнітного розсіяння головних полюсів $k_{\sigma g} = 1,2$ при $2p = 4$.

7.4 Довжина осердя головного полюса $l_p = l_a$, де l_a – з п. 3.10.

7.5 Задатися магнітною індукцією в осерді головного полюса з діапазону $B_p = 1,4 - 1,65$ Тл.

7.6 Ширина осердя головного полюса, мм,

$$b_{p2} = \frac{k_{\sigma g} \cdot \Phi_{nom} \cdot 10^6}{K_{Fep} \cdot B_p \cdot l_p},$$

де $k_{\sigma g}$, Φ_{nom} , B_p , l_p – з п.п. 7.3; 4.14; 7.5; 7.4; $K_{Fep} = 0,96$ – для електротехнічної сталі марки 3311 завтовшки 0,8 мм.

7.7 Вибрати значення магнітної індукції в станині з діапазону $B_{ys} = 1,2 - 1,4$ Тл.

7.8 Площа перерізу станини, мм²,

$$S_{ys} = \frac{k_{\sigma g} \cdot \Phi_{nom} \cdot 10^6}{2B_{ys}},$$

де $k_{\sigma g}$, Φ_{nom} , B_{ys} – з п.п. 7.3; 4.14; 7.7.

7.9 Вибрати конструктивну довжину станини, мм,

$$l_{ys\ cons} = (3,0 - 3,5) \cdot l_a,$$

де l_a – з п. 3.10.

Для механічного захисту обмоток головних полюсів довжина станини має бути більше довжини полюса на подвійну ширину котушки збудження (п. 10.6).

7.10 Вибрати висоту станини, мм,

$$h_{ys} = \frac{S_{ys}}{l_{yscal}},$$

де l_{yscal} – розрахункова довжина станини, $l_{yscal} = l_a + 0,75 \cdot \tau_p$; S_{ys} , l_a – з пп. 7.8; 3.10; τ_p – з п. 3.6.

Значення висоти станини округлити у більший бік до зручного числа.

7.11 Максимально допустиме значення висоти полюса, мм,

$$h_p = \frac{d_{se} - d_a - 2h_{ys} - 2\delta}{2},$$

де d_{se} , d_a , h_{ys} , δ – з пп.3.2; 7.10; 7.1.

Остаточне значення висоти полюса визначається після розміщення обмоток головних і додаткових полюсів.

7.12 Для висоти тіла полюса h_{p1} (див. рис. 7.2) рекомендується розмір на (8–12) мм менше, ніж h_p . Для радіуса заокруглення виступів полюсного наконечника r_{pbe} рекомендується розмір понад 2 мм.

7.13 Решта розмірів на рис. 7.2 визначається або приймається при конструюванні двигуна, зокрема:

$$r_{ae} = 0,5 \cdot d_a; \quad r_{pe} = 0,5 \cdot d_{se} - h_{ys} - h_{dgk} \quad \text{або} \quad r_{pe} = r_{ae} + \delta + h_p - h_{dgk},$$

де h_{dgk} – технологічний допуск на збірку магнітної системи двигуна, який при збірці компенсується феромагнітними прокладками відповідної товщини (орієнтовно $h_{dgk} = 1,5 - 2$ мм).

Для розрахунку розмірів наконечника головного полюса з ексцентриситетом проміжку є відповідна методика, яка містить систему складних формул. Але у даній методиці проектування ексцентриситет утворюється розмірами проміжку δ та δ_{max} під серединою і краєм наконечника.

8 ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТОРУШІЙНОЇ СИЛИ (МРС) НЕРОБОЧОГО ХОДУ

8.1 Розрахунок МРС обмотки збудження виконується на пару полюсів методом теорії магнітного кола, що пояснюється за допомогою рис. 8.1.

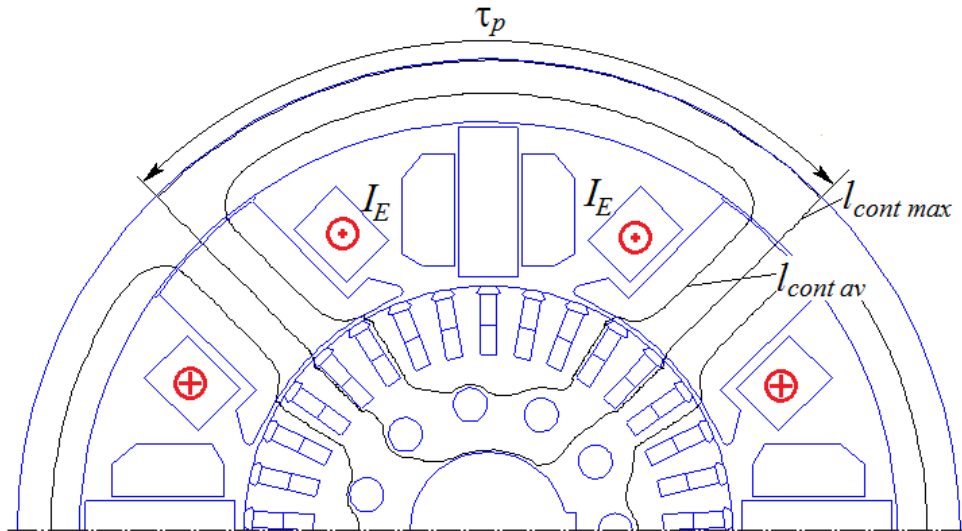


Рисунок 8.1 – Магнітне коло ДПС у межах двох полюсних кроків

На рисунку зображено два контури максимальної $l_{cont max}$ та середньої $l_{cont av}$ довжин, які замикаються у межах одного полюсного кроку τ_p , але зчеплені з котушками пари сусідніх головних полюсів. У цьому випадку ці контури збігаються з силовими лініями магнітного поля, які були отримані численним розрахунком магнітного поля, як на рис. 1.6. За одним з таких контурів можна було б знаходити магнітну напругу, що дорівнює МРС котушок обмотки збудження на пару полюсів. Але практично виконати розрахунки методом теорії магнітного кола за показаними контурами дуже проблематично.

Тому на пару полюсів береться деякий спрощений контур, який умовно розділяється на однорідні ділянки в межах станини, спинки осердя якоря, двох зубців осердя якоря, двох повітряних проміжків між осердями головного полюса і якоря, в осердях двох головних полюсів та у двох повітряних проміжків між осердями головного полюса і станиною. Відповідно довжини цих ділянок визначаються за наближеними спрощеними формулами.

За розрахунковими значеннями розмірів якоря, полюсів, ярма (п. 3.2; 3.6; 3.9; 5.1; 5.11; 5.24; 7.1; 7.2; 7.6; 7.10; 7.11) накреслити ескіз магнітного кола для

однієї пари полюсів, показати шлях силової спрощеної лінії та визначити довжини її ділянок в спинці осердя якоря l_{ya} , мм, і в станині l_{ys} , мм:

$$l_{ya} = \frac{\pi \cdot (d_a - 2 \cdot h_{na})}{2p}; \quad l_{ys} = \frac{\pi \cdot d_{se}}{2p},$$

де d_a , d_{se} , $2p$, h_{na} – з п.п. 3.2, 5.11.

8.2 Коефіцієнт повітряного проміжку

$$K_C = K_{\delta ta} \cdot K_{\delta gr},$$

де $K_{\delta ta}$ – коефіцієнт, який враховує збільшення магнітного опору повітряного проміжку внаслідок зубчато-пазової будови якоря:

$$K_{\delta ta} = \frac{\tau_a + 10\delta_{eq}}{b_{ta1} + 10\delta_{eq}},$$

$K_{\delta gr}$ – коефіцієнт, який враховує збільшення магнітного опору повітряного проміжку внаслідок наявності бандажних канавок на поверхні осердя якоря за його довжиною (рис. 8.2):

$$K_{\delta gr} = 1 + \frac{n_{gr} l_{gr} h_{gr}}{l_a (\delta_{eq} + h_{gr}) - n_{gr} l_{gr} h_{gr}}$$

де n_{gr} – кількість бандажних канавок; h_{gr} – висота бандажної канавки, мм, звичайно $h_{gr} = 3$ мм; l_{gr} – довжина бандажної канавки, мм; l_a ; τ_a , b_{ta1} , δ_{eq} – з п.п. 7.8; 5.1; 5.16; 7.1.

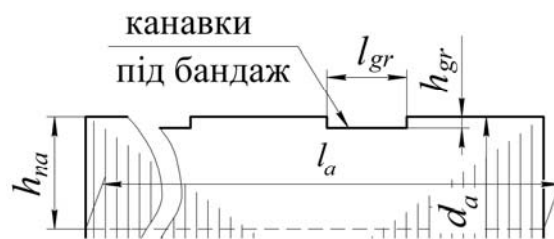


Рисунок 8.2 – Бандажні канавки на поверхні осердя якоря

Для надійної фіксації бандаж на осерді якоря розділяють мінімум на три частини (посередині та боках осердя). Довжина однієї канавки l_{gr} не повинна перевищувати 22 мм, а спільна довжина усіх канавок – не більше 30% довжини якоря l_a . Остаточна кількість канавок n_{gr} визначається за механічним розрахунком бандажа на його міцність.

Якщо бандажні канавки відсутні, коли провідники обмотки якоря утримуються в пазу клином, то приймається $K_{\delta gr}=1$.

8.3 Магнітна напруга в повітряному проміжку на пару полюсів, А,

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot 2\delta_{eq} \cdot K_C \cdot 10^{-3},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна; B_{δ} , δ_{eq} , K_C – з п.п. 4.14; 7.1; 8.2.

8.4 Визначити площу зубців якоря в трьох перерізах, розташованих під полюсним наконечником, мм²,

$$S_{ta1} = \frac{b_{pe}}{\tau_a} \cdot b_{ta1} \cdot l_{ef}; \quad S_{ta2} = \frac{b_{pe}}{\tau_a} \cdot b_{ta2} \cdot l_{ef}; \quad S_{ta3} = \frac{b_{pe}}{\tau_a} \cdot b_{ta3} \cdot l_{ef},$$

де b_{pe} , τ_a , b_{ta1} , b_{ta2} , b_{ta3} , l_{ef} – з п.п. 3.12; 5.1; 5.16; 5.15; 5.13; 3.11.

8.5 Магнітна індукція в трьох перерізах зубців, Тл,

$$B_{ta1} = \frac{\Phi_{nom} \cdot 10^6}{S_{ta1}}; \quad B_{ta2} = \frac{\Phi_{nom} \cdot 10^6}{S_{ta2}}; \quad B_{ta3} = \frac{\Phi_{nom} \cdot 10^6}{S_{ta3}},$$

де Φ_{nom} , S_{ta1} , S_{ta2} , S_{ta3} – з п.п. 4.14; 8.4.

8.6 Зубцеві коефіцієнти, що враховують відгалуження потоку в паз,

$$k_{ta1} = \frac{\tau_a \cdot l_a}{b_{ta1} \cdot l_{ef}} - 1; \quad k_{ta2} = \frac{\tau_{ta2} \cdot l_a}{b_{ta2} \cdot l_{ef}} - 1; \quad k_{ta3} = \frac{\tau_{ta3} \cdot l_a}{b_{ta3} \cdot l_{ef}} - 1,$$

де τ_a ; τ_{ta2} , τ_{ta3} , b_{ta1} , b_{ta2} , b_{ta3} , l_a , l_{ef} – з п.п. 5.1; 5.15; 5.13; 5.16; 3.10; 3.11.

8.7 По одному з рис. Б.1 або Б.2, або Б.3 з урахуванням зубцевих коефіцієнтів визначити значення напруженості магнітного поля в зубцях H_{ta1} , H_{ta2} , H_{ta3} для відповідних магнітних індукцій B_{ta1} , B_{ta2} , B_{ta3} і коефіцієнтів k_{ta1} , k_{ta2} , k_{ta3} . Якщо $B_{ta} \leq 1,8$ Тл, то H_{ta1} , H_{ta2} , H_{ta3} визначаються по табл. Б.1.

8.8 Розрахункове значення напруженості поля зубців, А/мм,

$$H_{tav} = \frac{H_{ta1} + 4 \cdot H_{ta2} + H_{ta3}}{6},$$

де H_{ta1} , H_{ta2} , H_{ta3} – з п.8.7.

8.9 Магнітна напруга зубців якоря, А,

$$F_{ta} = 2H_{tav} \cdot h_{na},$$

де h_{na} , H_{tav} – з п.п. 5.11; 8.8.

8.10 Магнітна індукція в осерді якоря, Тл,

$$B_{ya} = \frac{\Phi_{nom} \cdot 10^6}{2 \cdot h_{yascal} \cdot l_{ef}},$$

де h_{yascal} – розрахункова висота спинки осердя якоря, $h_{yascal} = h_{ya} - \frac{2}{3}k_v \cdot d_v$;

Φ_{nom} , l_{ef} , h_{ya} , $k_v \cdot d_v$ – з п.п. 4.14; 3.11; 5.25; 3.9.

8.11 За кривою намагнічування сталі 2212 (табл. Б.1) знайти для магнітної індукції B_{ya} відповідну напруженість магнітного поля H_{ya} .

8.12 Магнітна напруга осердя якоря, А,

$$F_{ya} = H_{ya} \cdot l_{ya},$$

де H_{ya} , l_{ya} – з п.п. 8.11; 8.1.

8.13 Магнітна індукція в осерді полюса, Тл,

$$B_{p2} = \frac{k_{\sigma g} \cdot \Phi_{nom} \cdot 10^6}{K_{Fep} \cdot l_p \cdot b_{p2}},$$

де $k_{\sigma g}$, Φ_{nom} , l_p , K_{Fep} , b_{p2} – з п.п. 7.3; 4.14; 7.4; 7.6.

8.14 За кривою намагнічування сталі 3411 (табл. Б.2) знайти для магнітної індукції B_{p2} відповідну напруженість магнітного поля H_{p2} .

8.15 Магнітна напруга осердя головних полюсів, А,

$$F_{p2} = 2 H_{p2} \cdot h_p,$$

де h_p , H_{p2} – з п.п. 7.11; 8.14.

8.16 Магнітна індукція в станині, Тл,

$$B_{ys} = \frac{k_{\sigma g} \cdot \Phi_{nom} \cdot 10^6}{2 \cdot h_{ys} \cdot l_{yscal}},$$

де $k_{\sigma g}$, Φ_{nom} , h_{ys} , l_{yscal} – з п.п. 7.3; 4.14; 7.10.

8.17 За кривою намагнічування сталі ст3 (табл. Б.3) знайти для індукції B_{ys} відповідну напруженість H_{ys} .

8.18 Магнітна напруга станини, А,

$$F_{ys} = H_{ys} \cdot l_{ys},$$

де H_{ys} , l_{ys} – з п.п. 8.17; 8.1.

8.19 Магнітна напруга стику полюсів і станини, А,

$$F_{\delta y} = \frac{B_{p2}}{\mu_0} \cdot 2\delta_y \cdot 10^{-3},$$

де B_{p2} , μ_0 , l_p – з п.п. 8.13; 8.3; 7.4; технологічний проміжок між осердям полюса і станиною $\delta_y = 2l_p \cdot 10^{-4} + 0,1$, мм.

8.20 Магнітна напруга на пару полюсів, А,

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{ta} + F_{ya} + F_{p2} + F_{ys} + F_{\delta y},$$

де F_{δ} , F_{ta} , F_{ya} , F_{p2} , F_{ys} , $F_{\delta y}$ – з п.п. 8.3; 8.9; 8.12; 8.15; 8.18; 8.19.

Оцінка правильності розрахунків здійснюється за співвідношенням F_{δ} та F_{Σ} : у машинах загальнопромислового призначення $F_{\delta} = (0,65 - 0,85) \cdot F_{\Sigma}$.

8.21 МРС усієї машини при неробочому ході, А,

$$F_o = p \cdot F_{\Sigma},$$

де p , F_{Σ} – з п.п. 3.2; 8.20.

8.22 Для побудови магнітної характеристики необхідно розрахувати МРС для значень магнітного потоку $(0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2) \cdot \Phi_{nom}$ і заповнити табл. 8.1.

Таблиця 8.1 – Розрахункові дані для побудови магнітної характеристики ДПС

Розрахункові величини	$0,5\Phi_{nom}$	$0,7\Phi_{nom}$	$0,9\Phi_{nom}$	$1,0\Phi_{nom}$	$1,1\Phi_{nom}$	$1,2\Phi_{nom}$
Φ_{δ} , Вб						
B_{δ} , Тл						
F_{δ} , А						
B_{ta1} , Тл						
B_{ta2} , Тл						
B_{ta3} , Тл						
H_{ta1} , А/мм						
H_{ta2} , А/мм						
H_{ta3} , А/мм						
H_{tay} , А/мм						
F_{ta} , А						
B_{ya} , Тл						
H_{ya} , А/мм						

Продовження таблиці 8.1

Розрахункові величини	$0,5\Phi_{nom}$	$0,7\Phi_{nom}$	$0,9\Phi_{nom}$	$1,0\Phi_{nom}$	$1,1\Phi_{nom}$	$1,2\Phi_{nom}$
F_{ya}, A						
$B_{p2}, Tл$						
$H_{p2}, A/мм$						
F_{p2}, A						
$B_{ys}, Tл$						
$H_{ys}, A/мм$						
F_{ys}, A						
$F_{\delta y}, A$						
$\frac{F_{\delta} + F_{ta} + F_{ya}}{2}, A$						
F_{Σ}, A						
F_o, A						

8.23 Побудувати магнітну характеристику $\Phi(F_o)$. При правильно виконаному проєкті ДПС номінальне значення магнітного потоку Φ_{nom} повинне знаходитися на перехідній ділянці цієї характеристики – на її згині.

Приклад магнітної характеристики надано на рис. 8.3.

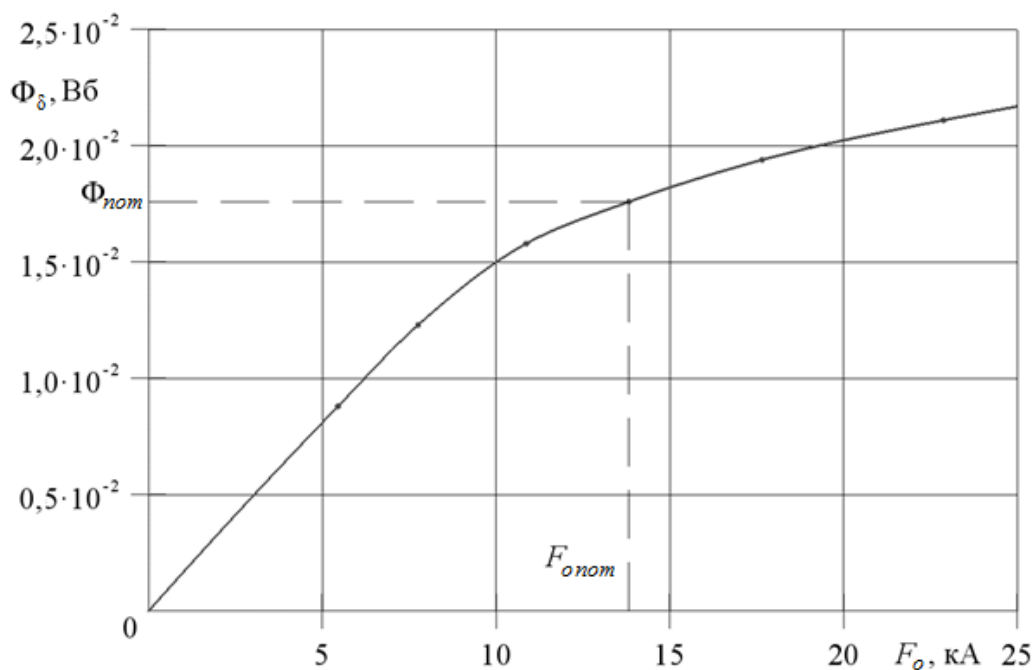


Рисунок 8.3 – Магнітна характеристика ДПС

9 ВИЗНАЧЕННЯ МРС ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ ДВИГУНА

9.1 При навантаженні двигуна слід враховувати вплив МРС реакції якоря на його основний магнітний потік. Обмотка збудження повинна забезпечити МРС, необхідну для наведення заданої ЕРС, і компенсувати розмагнічувальну дію реакції якоря.

За даними табл. 8.1 побудувати перехідну характеристику, тобто залежність $B_{\delta} \left(\frac{F_{\delta} + F_{ta} + F_{ya}}{2} \right)$ (рис. 9.1).

9.2 МРС поперечної реакції якоря на половину полюсної дуги, A ,

$$F_{ra} = \frac{1}{2} \cdot b_{pe} \cdot A,$$

де b_{pe} , A – п.п. 3.12; 4.14.

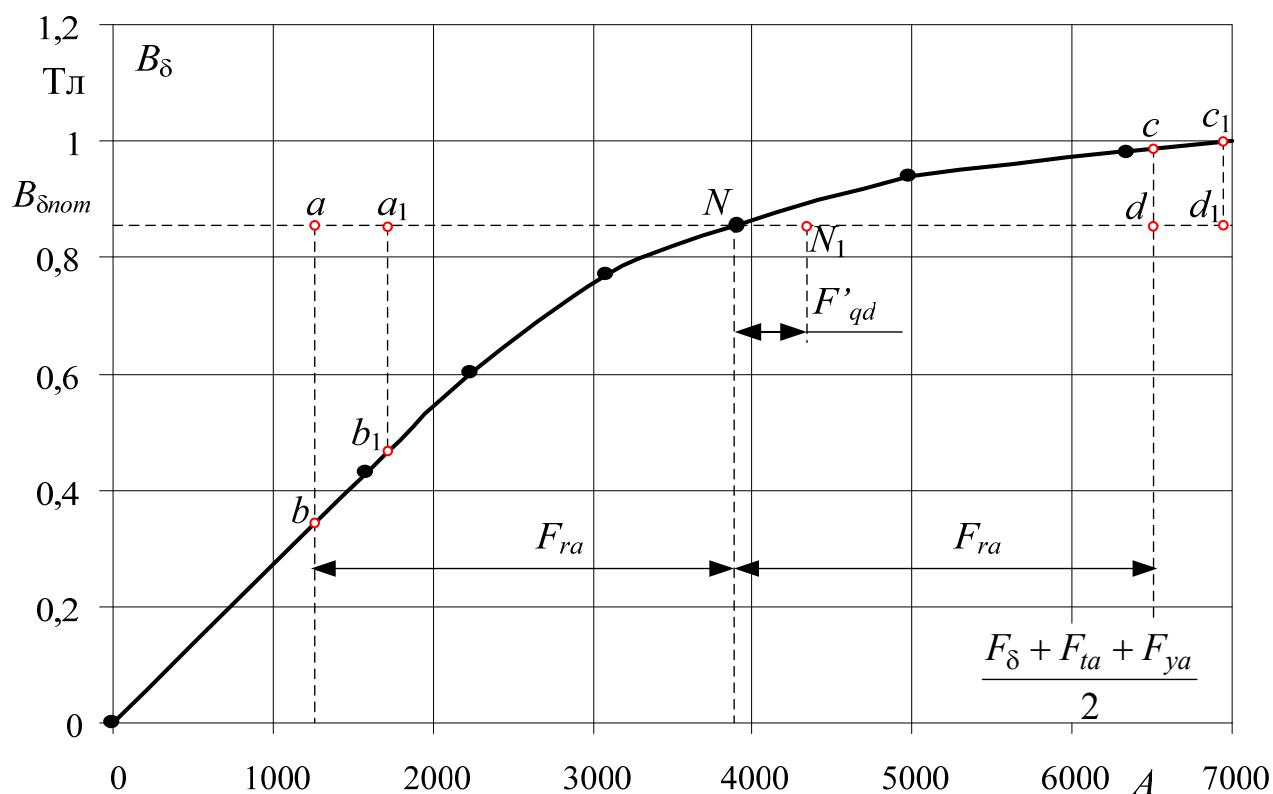


Рисунок 9.1 – Перехідна магнітна характеристика ДПС

9.3 Для визначення розмагнічувальної МРС поперечної реакції якоря можливе використання графічного методу.

На перехідній характеристиці (рис. 9.1) відкласти точку N , що відповідає $B_{\delta nom}$. Від точки N відкласти ліворуч і праворуч відрізки Na і Nb , які дорівнюють F_{ra} (п. 9.2). Побудувати криволінійні трикутники aNb і dNc . Зсунути відрізки ab і ca праворуч таким чином, щоб трикутники a_1b_1N і c_1d_1N стали рівними між собою за площею. При цьому величина $aa_1 = dd_1 = NN_1$ в масштабі буде дорівнювати розмагнічувальній МРС поперечної реакції якоря на один полюс.

МРС розмагнічувальної реакції якоря можна приблизно визначити так:

$$F'_{qd} = \frac{ab - cd}{ab + cd} \cdot \frac{A \cdot b_{pe}}{6}.$$

9.4 Сумарна розмагнічувальна МРС реакції якоря на пару полюсів, A ,

$$F_{qd} = 2F'_{qd},$$

де F'_{qd} – з п.9.3.

9.5 МРС збудження при номінальному навантаженні, A ,

$$F_{EN} = F_{onom} + pF_{qd},$$

де p , F_{qd} – з п.п. 3.2; 9.4; F_{onom} – значення F_o з п. 8.22 при номінальному значенні магнітного потоку Φ_{nom} .

10 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

10.1 Котушка обмотки збудження разом з осердям головного полюса зображена на рис. 10.1.

Попереднє значення середньої довжини витка котушки обмотки збудження, мм,

$$l_{Eav} = 2(b_{p2} + l_p) + \pi \cdot (b_{Ec} + 2\Delta_{in} + 2\Delta_{Ec}),$$

де b_{p2} , l_p – з пп. 7.6; 7.4; b_{Ec} – ширина котушки обмотки збудження, попередньо приймається $b_{Ec} = 30-60$ мм; Δ_{in} , Δ_{Ec} – товщини корпусної ізоляції та каркаса $\Delta_{in} = 1$ мм і $\Delta_{Ec} = 2-3$ мм.

10.2 Густина струму в обмотці збудження

$$J_E = (3,0-4,5) \text{ А/мм}^2.$$

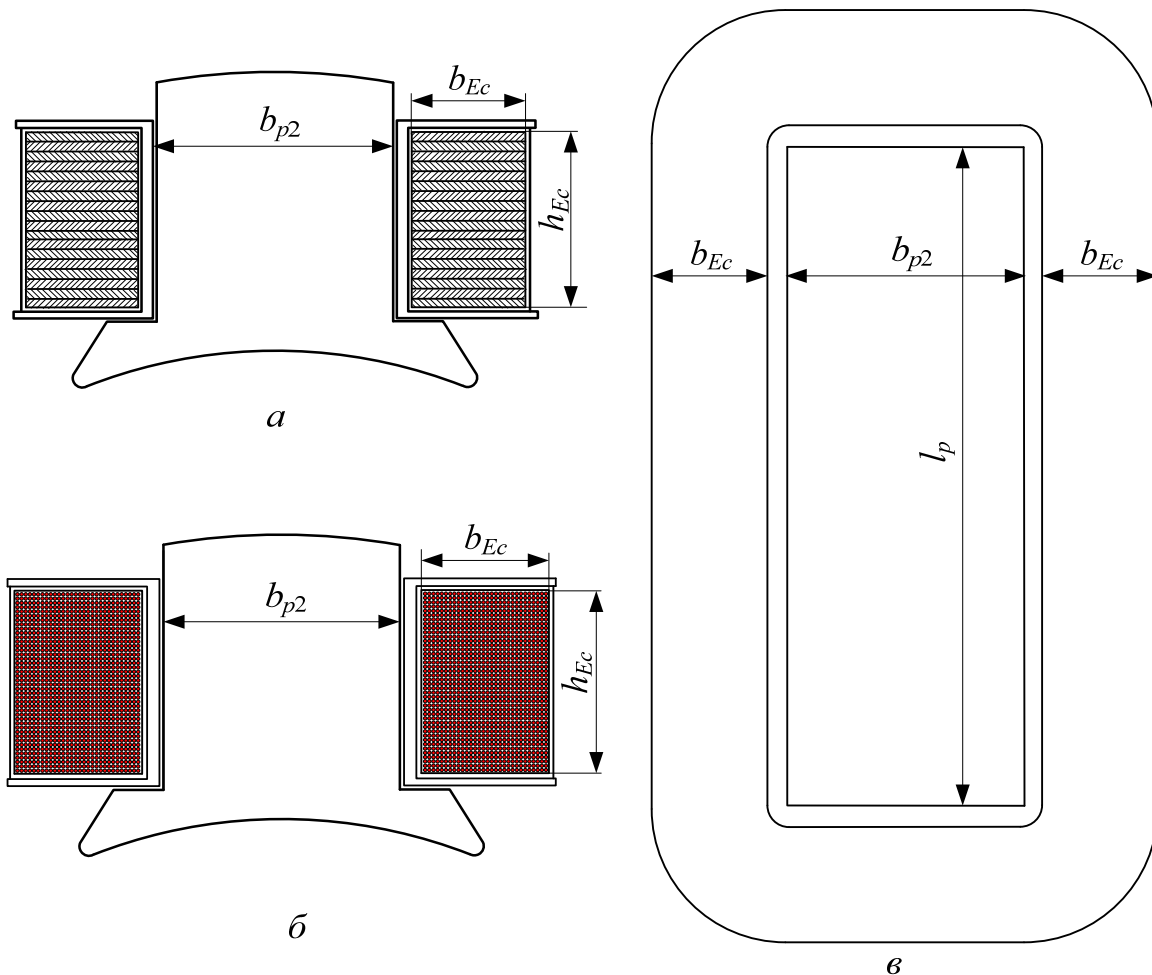


Рисунок 10.1 – Розміри провідникової частини котушки головного полюса:
a – послідовного збудження; *б* – незалежного або паралельного збудження;
в – периметр котушки

10.3 Розрахунковий переріз провідника обмотки, зведений до розрахункової температури 115°C, мм²,

$$S_{cE} = \frac{F_{EN} \cdot l_{Eav} \cdot 1,38 \cdot \rho_{Cu} \cdot 10^{-3}}{U_E \cdot a_E} \quad \text{– для паралельної та незалежної обмоток;}$$

$$S_{cE} = \frac{I_{aN}}{a_E \cdot J_E} \quad \text{– для послідовної обмотки,}$$

де F_{EN} , l_{Eav} , ρ_{Cu} , I_{aN} , J_E – з п.п. 9.5; 10.1; 5.20; 3.15; 10.2; U_E – напруга збудження, при паралельному збудженні $U_E = U_N$ (з п. 2.3), при незалежному збудженні U_E з п. 2.4 – напруга незалежного джерела; a_E – кількість паралельних віток обмотки збудження: звичайно приймається $a_E = 1$, у спеціальних випадках може бути $a_E = 2$.

10.4 За табл. 10.1, А.1, А.2, А.3, А.4 за площею перерізу S_{cE} і способом збудження вибрати марку і розміри провідника без ізоляції $a_E \times b_E$ або d_E при прямокутному або круглому перерізі провідника відповідно. Залежно від вибраного провідника уточнити його площу перерізу без ізоляції S_{cE} і за табл. А.2 розрахувати його розміри в ізоляції $a_{Eis} \times b_{Eis}$ або d_{Eis} .

Таблиця 10.1 –Марки проводів та їхнє застосування

Площа перерізу провідника S_{cE} , мм ²	Марка проводу	Тип обмотки збудження
до 8	ПСД, ПСДК, ПЭТ-155	Паралельна обмотка Багатошарова котушка з провідників круглого перерізу
більше 8	ПСД, ПСДК	Паралельна обмотка Багатошарова котушка з провідників прямокутного перерізу з відношенням боків 1,4–1,8
до 25	ПСД, ПСДК, ПЭТМ-155	Послідовна обмотка Багатошарова котушка з провідників прямокутного перерізу з відношенням боків 8–10
більше 25	Гола шинна мідь	Послідовна обмотка Одношарова котушка із смугової міді з відношенням боків 10–12

10.5 Попередня кількість витків на один полюс

$$N_{Ep} = \frac{F_{EN} \cdot a_E}{2p \cdot J_E \cdot S_{cE}},$$

де F_{EN} , $2p$, J_E , a_E , S_{cE} – з п.п. 9.5; 3.2; 10.2; 10.3; 10.4.

Якщо при послідовному збудженні округлення N_{Ep} до цілого числа перевищує (15–20)%, то обмотка виконується з $a_E = 2$ або 4; при цьому, відповідно, слід зменшити величину S_{cE} . Зазвичай в паралельній та незалежній обмотках приймають $a_E = 1$.

10.6 Ширина перерізу боку котушки обмотки збудження (рис. 10.1), мм,

$$b_{Ec} = \frac{1,15 \cdot d_{Eis}^2 \cdot N_{Ep}}{h_{Ec}} \text{ – для багат шарової котушки з проводу круглого пе-}$$

рерізу;

$$b_{Ec} = \frac{1,15 \cdot a_{Eis} \cdot b_{Eis} \cdot N_{Ep}}{h_{Ec}} \text{ – для багат шарової котушки з проводу прямоку-}$$

тного перерізу;

$$b_{Ec} = b_{p2} = \frac{S_{cE}}{\frac{h_{Ec}}{N_{Ep}} - 0,3} \text{ – для одно шарової котушки,}$$

де d_{Eis} , a_{Eis} , b_{Eis} , S_{cE} , N_{Ep} – з п.п. 10.4; 10.3; 10.5; h_{Ec} – висота котушки збудження, визначається з умов розміщення котушки в міжполюсному вікні (рис. Г.1). Обмотка збудження розміщується на осерді головного полюса за допомогою сталевого каркаса з напиленням епоксидною смолою. Для охолодження необхідно мати на увазі рекомендоване обмеження ширини $b_{Ec} \leq 60$ мм.

Після розміщення на кресленику головних і додаткових полюсів і їх обмоток встановити остаточні розміри котушок. Якщо площа міжполюсного вікна не дозволяє розмістити обмотки, то необхідно збільшити внутрішній діаметр станини, висоту полюса, перейти на більшу висоту осі обертання та повторити розрахунок.

10.7 Уточнити довжину станини $l_{ys\ cons}$ (п. 7.9).

10.8 Уточнити кількість витків котушки N_{Ep} з умов розміщення на полюсі.

10.9 Кількість витків обмотки збудження

$$N_E = 2p \cdot N_{Ep},$$

де $2p$, N_{Ep} – з п.п. 3.2; 10.8.

10.10 Уточнити середню довжину витка, мм,

$$l_{Eav} = 2 \cdot (b_{p2} + l_p) + \pi \cdot (b_{Ec} + 2 \cdot \Delta_{in} + 2 \cdot \Delta_{Ec}),$$

де b_{p2} , l_p , b_{Ec} , Δ_{in} , Δ_{Ec} – з п.п. 7.6; 7.4; 10.6; 10.1.

10.11 Опір обмотки збудження, зведений до температури 115°C, Ом,

$$R_E = \frac{N_E \cdot l_{Eav} \cdot 1,38 \cdot \rho_{Cu} \cdot 10^{-3}}{S_{cE} \cdot a_E^2},$$

де N_E , l_{Eav} , ρ_{Cu} , S_{cE} , a_E – з п.п. 10.9; 10.10; 5.20; 10.4; 10.3.

10.12 Номінальний струм збудження при незалежному і паралельному збудженні, А,

$$I_{EN} = J_E \cdot S_{cE},$$

де J_E, S_{cE} – з п.п. 10.2; 10.4.

10.13 Для паралельної і незалежної обмоток збудження перевірити значення максимального струму збудження, А,

$$I_{Em} = \frac{U_E}{R_E},$$

де U_E, R_E – з п.п. 10.3; 10.11.

Якщо $I_{Em} < I_{EN}$ (п. 10.12), то необхідно збільшити S_E (п. 10.4).

11 РОЗРАХУНОК КОМУТАЦІЇ ТА ДОДАТКОВИХ ПОЛЮСІВ

11.1 Визначити ширину зони комутації, мм,

$$b_{zc} = \left(\frac{b_b}{\tau_c} + u_n - \frac{a}{p} + \varepsilon_k \right) \cdot \tau_c \cdot \frac{d_a}{d_c},$$

де $b_b, \tau_c, u_n, a, p, d_a, \varepsilon_k, d_c$ – з п.п. 6.7; 6.3; 4.8; 4.1; 3.2; 4.17; 6.1.

Для машин середньої потужності є межа $b_{zc} \leq 0,7 \cdot (\tau_p - b_{pe})$; де τ_p, b_{pe} – з п.п. 3.6; 3.12.

11.2 Попередня розмір повітряного проміжку між додатковим полюсом і якорем δ_d вибирається за рис. 11.1.

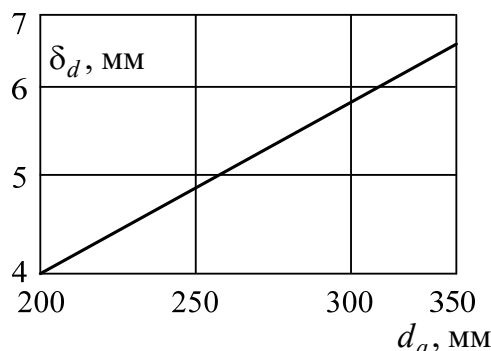


Рисунок 11.1 – Вибір розміру повітряного проміжку між додатковим полюсом і якорем залежно від діаметра останнього

Розміри осердя додаткового полюса разом з поперечним перерізом його котушки та шириною зони комутації по поверхні якоря надано на рис. 11.2.

11.3 Ширина полюсного наконечника додаткового полюса, мм,

$$b_{adn} = (0,55 - 0,75)b_{zc}$$

де b_{zc} – з п. 11.1.

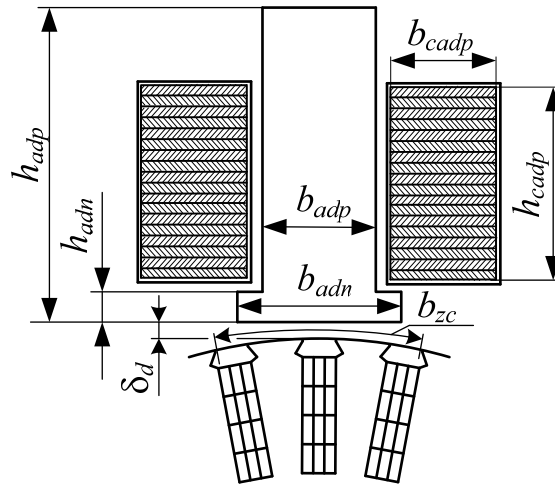


Рисунок 11.2 – Додатковий полюс разом з частиною поверхні якоря ДПС

11.4 Довжина та висота осердя додаткового полюса, мм,

$$l_{adp} = l_{Fe}; h_{adp} = h_p - (\delta_d - \delta),$$

де l_{Fe} , h_p , δ_d , δ – з п.п. 3.10; 7.11; 11.2; 7.1.

11.5 Висота наконечника додаткового полюса, мм,

$$h_{adn} = 0,2 b_{adn},$$

де b_{zc} – з п. 11.3.

11.6 Ширина осердя додаткового полюса, мм,

$$b_{adp} = (0,7 - 0,8)b_{adn},$$

де b_{adn} – з п. 11.3.

11.7 Питома магнітна провідність пазового розсіяння

$$\lambda_{na} = 0,6 \frac{h_{na}}{b_{na}} + \frac{l_{fnav}}{l_a} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_s \cdot l_a \cdot A \cdot v_a} \cdot \frac{a}{p},$$

де h_{na} , b_{na} , l_{fnav} , l_a , w_s , A , v_a , a , p – з п.п. 5.11; 5.18; 3.10; 4.6; 4.14; 3.7; 4.1; 3.2.

11.8 Середнє значення реактивної ЕРС комутувальної секції, В,

$$e_r = 2w_s \cdot l_a \cdot A \cdot v_a \cdot \lambda_{na} \cdot 10^{-6},$$

де w_s , l_a , A , v_a , λ_{na} – з п.п. 4.6; 3.10; 4.14; 3.7; 11.7.

У машинах з додатковими полюсами звичайно $e_r = 1,0 - 5,0$ В.

11.9 Магнітна індукція комутувального магнітного поля, Тл,

$$B_{dc} = \lambda_{na} \cdot A \cdot 10^{-3},$$

де λ_{na} , A – з п.п. 11.7, 4.14.

Для забезпечення прискореної комутації потрібно отримане значення B_{dc} збільшити на 10–15%.

11.10 Визначити магнітний потік під додатковим полюсом, Вб,

$$\Phi_{dc} = B_{dc} \cdot l_{adp} \cdot (b_{adn} + 2\delta_d) \cdot 10^{-6},$$

де B_{dc} , l_{adp} , b_{adn} , δ_d – з п.п. 11.9; 11.4; 11.3; 11.2.

11.11 Магнітний потік в осерді додаткового полюса, Вб,

$$\Phi_{adp} = k_{\sigma d} \cdot \Phi_{dc},$$

де Φ_{dc} – з п.п. 11.10; $k_{\sigma d}$ – коефіцієнт магнітного розсіювання, для машин без компенсаційної обмотки, $k_{\sigma d} = 2-3$.

11.12 Магнітна індукція в осерді додаткового полюса, Тл,

$$B_{adp} = \frac{\Phi_{adp}}{b_{adp} \cdot l_{adp}} \cdot 10^6,$$

де Φ_{adp} , b_{adp} , l_{adp} – з п.п. 11.11; 11.6; 11.4.

Необхідно, щоб було обмеження $B_{adp} \leq 1,0$ Тл.

11.13 Коефіцієнт повітряного проміжку додаткового полюса

$$K_{Cd} = \frac{\tau_a + 10 \cdot \delta_d}{b_{ta1} + 10 \cdot \delta_d},$$

де τ_a , b_{ta1} , δ_d – з п.п. 5.1; 5.16; 11.2.

11.14 МРС повітряного проміжку під додатковим полюсом на пару полюсів, А,

$$F_{adp} = \frac{B_{dc}}{\mu_0} \cdot 2\delta_d \cdot K_{Cd} \cdot 10^{-3},$$

де B_{dc} , μ_0 , δ_d , K_{Cd} – з п.п. 11.9; 8.3; 11.2; 11.13.

11.15 Кількість витків на один додатковий полюс

$$N_{adp} = \frac{a_{adp} \cdot (F_{adp} + \tau_p \cdot A)}{2I_{aN}},$$

де F_{adp} , τ_p , A , I_{aN} – з п.п. 11.14; 3.6; 4.14; 3.15; a_{adp} – кількість паралельних виток обмотки додаткового полюса, при $I_{aN} < 1000$ А приймається $a_{adp} = 1$.

11.16 Коефіцієнт компенсації МРС якоря

$$k_{ac} = \frac{2 \cdot N_{adp} \cdot I_{aN}}{\tau_p \cdot A \cdot a_{adp}},$$

де N_{adp} , I_{aN} , τ_p , A , a_{adp} – з п.п. 11.15, 3.15; 3.6; 4.14; 11.15.

Для машин загальнопромислового застосування $k_{ac}=1,2-1,5$. Якщо розрахована величина k_{ac} не входить в цей діапазон, то необхідно змінити довжину проміжку δ_d і повторити розрахунок з п. 11.2.

11.17 Приймаємо густину струму в обмотці додаткового полюса з діапазону $J_{adp} = 3,5 - 6,0$ А/мм². Менші значення J_{adp} відповідають частотам обертання якоря менше 1000 об/хв і багатошаровим обмоткам.

11.18 Розрахункова площа поперечного перерізу провідника обмотки додаткового полюса, мм²,

$$S_{cadp} = \frac{I_{aN}}{a_{adp} \cdot J_{adp}},$$

де I_{aN} , a_{adp} , J_{adp} – з п.п. 3.15; 11.15; 11.17.

11.19 За табл. 11.1; А.3; А.4 вибрати тип обмотки, провід, його розміри $a_{ad} \times b_{ad}$, уточнити площу поперечного перерізу S_{cadp} .

Таблиця 11.1 – До вибору типу обмотки і марки провідника залежно від розрахункової площі його поперечного перерізу

Поперечний переріз провідника, S_{wadp} , мм ²	Марка провідника	Тип обмотки
≤ 25	ПЭТВ, ПСДК, ПЭТ-155	Багатошарова котушка Провідники прямокутного поперечного перерізу
> 25	Гола шинна мідь	Одношарова по ширині котушка з намотуванням міді на ребро

11.20 На ескізі магнітної системи (рис. В.1) розмістити додаткові полюси з обмотками. Мінімальна відстань між обмотками головного та додаткового полюсів у міжполюсному вікні має бути не менше 10 мм. При необхідності коригування збільшити діаметр станини, висоту головного та додаткового полюсів, перейти на більшу висоту осі обертання h (п. 3.2) і повторити розрахунок.

Отримані розміри магнітної системи, обмоток головних і додаткових полюсів вважати остаточними.

11.21 Середня довжина витка обмотки додаткового полюса, мм,

$$l_{wadv} = 2(b_{adv} + l_{adv}) + \pi(\Delta_{cd} + 2\Delta_{ins} + b_{cadv}),$$

де b_{adv} , l_{adv} , – з п.п. 11.6; 11.4; Δ_{cd} – товщина стінки каркаса обмотки додаткового полюса, $\Delta_{cd} = 2-4$ мм, Δ_{ins} – товщина ізоляції каркаса, $\Delta_{ins} = 1$ мм; b_{cadv} – товщина котушки, яка дорівнює ширині її проводу (див. рис. 11.2).

11.22 Опір обмотки додаткових полюсів, зведений до розрахункової температури 115°C, Ом,

$$R_{ad} = \frac{2p \cdot N_{adv} \cdot l_{wadv} \cdot 1,38 \cdot \rho_{Cu} \cdot 10^{-3}}{S_{cadv} \cdot a_{adv}^2},$$

де $2p$, l_{wadv} , N_{adv} , ρ_{Cu} , a_{adv} , S_{cadv} – з п.п. 3.2; 11.21; 5,20, 11.15; 11.19.

11.23 Визначити падіння напруги в обмотці додаткових полюсів $I_{aN}R_d$, В, де I_{aN} , R_{ad} – з п.п. 3.15; 11.22.

12 МАСИ СКЛАДОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ДВИГУНА В ЦІЛОМУ

12.1 Маса міді обмотки якоря, кг,

$$m_{wa} = 8,9 \cdot z_a \cdot \frac{l_{Wav}}{2} \cdot S_{ca} \cdot 10^{-6},$$

де z_{ia} , l_{Wav} , S_{ca} – з п.п. 4.13; 5.19; 5.9.

12.2 Маса міді обмотки збудження, кг,

$$m_{wE} = 8,9 \cdot 2p \cdot N_{Ep} \cdot l_{Eav} \cdot S_{cE} \cdot 10^{-6},$$

де N_{Ep} , l_{Eav} , S_{cE} – з п. п.10.9; 10.10; 10.4.

12.3 Маса міді обмотки додаткових полюсів, кг,

$$m_{wadv} = 8,9 \cdot 2p \cdot N_{adv} \cdot l_{wadv} \cdot S_{cadv} \cdot 10^{-6},$$

де $2p$, N_{adv} , l_{wadv} , S_{cadv} – з п.п. 3.2; 11.15; 11.21; 11.19.

12.4 Маса міді колектора, кг,

$$m_c = 5,25 \cdot d_c^{1,5} \cdot l_c \cdot 10^{-5},$$

де d_c , l_c – з п.п. 6.1; 6.12.

12.5 Загальна маса активної міді, кг,

$$m_{Cu} = m_{wa} + m_{wE} + m_{wadv} + m_c,$$

де m_{wa} , m_{wE} , m_{wadv} , m_c – з п.п. 12.1; 12.2; 12.3; 12.4.

12.6 Маса спинки осердя якоря, кг,

$$m_{ya} = 7,8 \cdot \left[\frac{\pi \cdot ((d_a - 2h_{na})^2 - d_{ai}^2)}{4} - 0,785 \cdot n_v \cdot d_v^2 \right] \cdot l_{ef} \cdot 10^{-6},$$

де d_a , h_{na} , n_v , d_v , l_{ef} , d_{ai} – п.п. 3.2; 5.11; 3.9; 3.11; 5.24.

12.7 Маса зубців якоря при прямокутних пазах, кг,

$$m_{ta} = 7,8 \cdot Q_a \cdot h_{na} \cdot b_{ta2} \cdot l_{ef} \cdot 10^{-6},$$

де Q_a , h_{na} , b_{ta2} , l_{ef} – з п.п. 4.12; 5.11; 5.15; 3.11.

12.8 Маса головних полюсів, кг,

$$m_{gp} = 7,8 \cdot 2p \cdot l_p \cdot b_{p2} \cdot h_p \cdot 10^{-6},$$

де $2p$, l_p , b_{p2} , h_p – з п.п. 3.2; 7.4; 7.6; 7.11.

12.9 Маса додаткових полюсів, кг,

$$m_{adv} = 7,8 \cdot 2p \cdot l_{adv} \cdot b_{adv} \cdot h_{adv} \cdot 10^{-6},$$

де $2p$, l_{adv} , b_{adv} , h_{adv} – з п.п. 3.2; 11.4; 11.6.

12.10 Маса станини, кг,

$$m_{ys} = 7,8 \cdot k_{ys} \cdot \pi \cdot (d_{se} - h_{ys}) \cdot l_{ys} \cdot h_{ys} \cdot 10^{-6}$$

де d_{se} , h_{ys} , l_{ys} – з п.п. 3.2; 7.10; 10.7; $k_{ys} = 1,15$ – для машин середньої потужності.

12.11 Загальна маса активної сталі, кг,

$$m_{Fe} = m_{ya} + m_{ta} + m_{gp} + m_{adv} + m_{ys},$$

де m_{ya} , m_{ta} , m_{gp} , m_{adv} , m_{ys} – з п.п. 12.6; 12.7; 12.8; 12.9; 12.10.

12.12 Загальна маса активних матеріалів двигуна, кг,

$$m_{act} = m_{Cu} + m_{Fe},$$

де m_{Cu} , m_{Fe} – з п.п. 12.5; 12.11.

12.13 Питома маса активних матеріалів, кг/кВт,

$$\xi_{act} = \frac{m_{act}}{P_N},$$

де m_{act} , P_N – з п.п. 12.12; 2.1.

12.14 Маса ізоляції двигуна, кг,

$$m_{is} = (3,8 \cdot d_{se}^{1,5} + 0,2 \cdot d_{se} \cdot l_a) \cdot 10^{-4},$$

де d_{se} , l_a – з п.п. 3.2; 3.10.

12.15 Маса конструкційних матеріалів, кг,

$$m_{cons} = (C \cdot d_{se}^2 \cdot l_a + D \cdot d_{se}^3) \cdot 10^{-6},$$

де коефіцієнти C і D беруться з табл. 12.1, d_{se} , l_a – з п.п. 3.2; 3.10

12.16 Розрахована маса двигуна

$$m_{dcm} = m_{act} + m_{is} + m_{cons},$$

де m_{act} , m_{is} , m_{cons} – з п.п. 12.12; 12.14; 12.15.

Розрахована маса двигуна не враховує маси радіального вентилятора та покупних виробів, таких як вальниці, електротехнічні щітки та ін.

Таблиця 12.1 – Коефіцієнти C і D для розрахунку маси конструкційних матеріалів двигуна

Висота осі обертання h , мм	Ступінь захисту	Спосіб охолодження	Коефіцієнти	
			C	D
≤200	IP22	IC01	0,6–0,8	0,8–1,0
215–315	IP22	IC01	0,7–0,9	0,8–1,0
≤200	IP44	IC0041	0,5–0,8	0,8–1,0

13 ВТРАТИ ТА ККД ДВИГУНА

13.1 Електричні втрати в обмотці якоря, Вт,

$$P_{ela} = I_{aN}^2 \cdot R_a,$$

де I_{aN} , R_a – з п.п. 3.15; 5.20.

13.2 Електричні втрати в обмотці збудження, Вт:

$$P_{elE} = I_{EN}^2 \cdot R_E \text{ – при паралельному та незалежному збудженні,}$$

$$P_{elE} = I_{aN}^2 \cdot R_E \text{ – при послідовному збудженні,}$$

де I_{EN} , I_{aN} , R_E – з п.п. 10.12; 3.15; 10.11.

13.3 Електричні втрати в обмотці додаткових полюсів, Вт,

$$P_{elad} = I_{aN}^2 \cdot R_{ad},$$

де I_{aN} , R_{ad} – з п.п. 3.15; 11.22.

13.4 Електричні втрати в щітковому контакті, Вт,

$$P_{elb} = 2\Delta U_b \cdot I_{aN},$$

де $2\Delta U_b$, I_{aN} – з п.п. 6.7; 3.15.

13.5 Додаткові втрати, Вт,

$$P_{ad} = 0,01 \cdot \frac{P_N \cdot 10^3}{\eta},$$

де P_N , η – з п.п. 2.1; 3.3.

13.6 Втрати на тертя щіток об колектор, Вт,

$$P_{mecb} = 0,5 \cdot S_{b\Sigma} \cdot v_c \cdot 10^{-3},$$

де $S_{b\Sigma}$, v_c – з п.п. 6.11; 6.2.

13.7 Магнітні втрати в сталі зубців якоря, Вт,

$$P_{magta} = 4,1 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_a}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{ta} \cdot B_{ta2}^2,$$

де f_a , m_{ta} , B_{ta2} – з п.п. 3.8; 12.7; 8.5; $p_{1,0/50} = 2,2$ Вт/кг – питомі втрати в сталі 2212 при магнітній індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц.

13.8 Магнітні втрати в осерді якоря, Вт,

$$P_{magya} = 4,3 \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_a}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{ya} \cdot B_{ya}^2,$$

де $p_{1,0/50}$, f_a , m_{ya} , B_{ya} – з п.п. 13.7; 3.8; 12.6; 8.10.

13.9 Втрати на тертя в вальницях і вентиляцію, Вт,

$$P_{mec} = 780 \cdot d_a^{3,6} \cdot \left(\frac{n_N}{1500}\right)^{1,8} \cdot 10^{-9},$$

де d_a , n_N – з п.п. 3.2; 2.3.

13.10 Сумарні втрати при номінальному навантаженні, Вт,

$$\Delta P = P_{ela} + P_{elE} + P_{elad} + P_{elb} + P_{ad} + P_{mecb} + P_{magta} + P_{magya} + P_{mec},$$

де P_{ela} , P_{elE} , P_{elad} , P_{elb} , P_{ad} , P_{mecb} , P_{magta} , P_{magya} , P_{mec} – з п.п. 13.1-13.9.

13.11 ККД двигуна при номінальному навантаженні, в. о.,

$$\eta_N = \frac{P_N \cdot 10^3}{P_N \cdot 10^3 + \Delta P},$$

де P_N , ΔP – з п.п. 2.1; 13.10.

13.12 Складові втрат постійні P_{const} і змінні P' і P'' та ККД двигуна при частковому навантаженні, що характеризується відносним значенням струму якоря $\beta_{Ia} = I_a / I_{aN}$. Результати розрахунків занести в табл. 13.1.

Таблиця 13.1 – Розрахункові дані для характеристики ККД двигуна

β_{Ia}	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
P_{const} , Вт					
$\beta_{Ia} P'$, Вт					
$\beta_{Ia}^2 P''$, Вт					
ΔP_{Ia} , Вт					
P_{in} , Вт					
P , Вт					
η , в. о.					

Складові втрат, Вт,

- при паралельному і незалежному збудженні

$$P_{const} = P_{mecb} + P_{magta} + P_{magya} + P_{mec} + P_{elE};$$

$$P' = P_{elb};$$

$$P'' = P_{ela} + P_{elad} + P_{ad};$$

- при послідовному збудженні

$$P_{const} = P_{mecb} + P_{magta} + P_{magya} + P_{mec};$$

$$P' = P_{elb};$$

$$P'' = P_{ela} + P_{elE} + P_{elad} + P_{ad};$$

де P_{mecb} , P_{magta} , P_{magya} , P_{mec} , P_{elE} , P_{ela} , P_{eld} , P_{ad} – з п.п. 13.1-13.9.

13.13 Втрати при частковому навантаженні, Вт,

$$\Delta P_{Ia} = P_{const} + \beta_{Ia} P' + \beta_{Ia}^2 P''.$$

13.14 Вхідна потужність двигуна при частковому навантаженні, Вт,

$$P_{in} = \beta_{Ia} U_N I_{aN},$$

де U_N з п. 2.2, I_{aN} з п. 3.15.

13.15 Вихідна корисна потужність на валу двигуна при частковому навантаженні, Вт,

$$P = P_{in} - \Delta P_{Ia},$$

де ΔP_{Ia} з п.3.13, P_{in} з п. 3.14.

13.16 Поточний ККД двигуна при частковому навантаженні, в. о.,

$$\eta = \frac{P}{P_{in}}.$$

14 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА

14.1 Нагрів машини викликається втратами потужності. Тепловий розрахунок проводиться за окремими ділянками перетворення енергії спрощеним методом з використанням емпіричних коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі.

Тепловий розрахунок дозволяє визначити очікуване стале перевищення температури обмоток і колектора при тривалому режимі роботи S1.

Отримані в результаті теплового розрахунку перевищення температури окремого вузла над температурою охолодного середовища не повинні перевищувати допустимих значень для заданого класу нагрівостійкості ізоляції. Для ізоляції класу нагрівостійкості F (155°C) граничне допустиме перевищення температури обмоток машини становить 100°C, колектора – 90°C.

14.2 Тепловий розрахунок обмотки якоря.

14.2.1 Перевищення температури поверхні осердя якоря над температурою повітря усередині машини, °C,

$$\Delta\theta_a = \frac{P_{ela} \cdot (2 \cdot l_a / l_{Wav}) + P_{magta} + P_{magya}}{\pi \cdot (d_a + n_v \cdot d_v) \cdot l_a \cdot \alpha_A},$$

де P_{ela} , l_a , l_{Wav} , P_{magta} , P_{magya} , d_a , d_v – з п.п. 13.1; 3.10; 5.19; 13.7; 13.8; 3.2; 3.9; α_A – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні осердя якоря (рис. 14.1), v_a з п. 3.7.

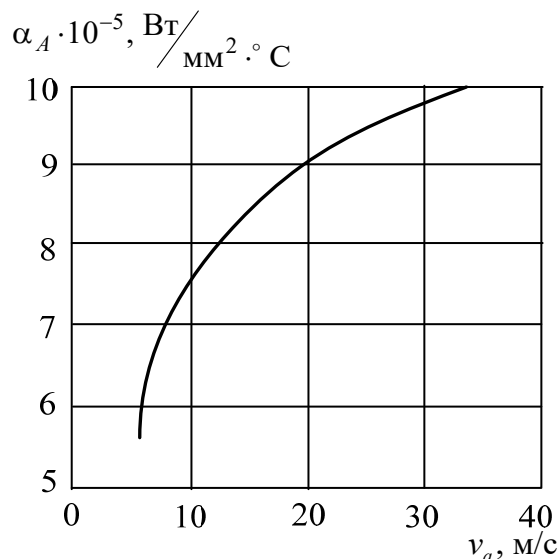


Рисунок 14.1 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі з поверхні осердя якоря від окружної швидкості якоря (де v_a з п. 3.7)

14.2.2 Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки якоря, °C,

$$\Delta\theta_{an} = \frac{P_{ela} \cdot (2 \cdot l_a / l_{Wav})}{2 \cdot Q_a \cdot (h_{na} + b_{na}) \cdot l_a} \cdot \frac{b_{ais}}{2 \cdot \lambda_{eq}},$$

де P_{ela} , l_a , l_{Wav} , Q_a , h_{na} , b_{na} , b_{ais} – з п.п. 13.1; 3.10; 5.19; 4.12; 5.9;

$\lambda_{eq} = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·°С) – коефіцієнт теплопровідності пазової ізоляції.

14.2.3 Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки якоря над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\Delta\theta_{fha} = \frac{P_{ela} \cdot (2 \cdot l_{fhav} / l_{Wav})}{4\pi \cdot d_a \cdot l_{fha} \cdot \alpha_A},$$

де P_{ela} , l_{fhav} , l_{Wav} , d_a , l_{fha} , α_A – з п.п. 13.1; 5.18; 5.19; 3.2; 5.17; 14.1.1.

14.2.4 Перепад температури в ізоляції лобових частин обмотки, °С,

$$\Delta\theta_{isa} = \frac{P_{ela} \cdot (2 \cdot l_{fhav} / l_{Wav})}{2 \cdot Q_a \cdot (h_{na} + b_{na}) \cdot l_{fhav}} \cdot \frac{b_{savis}}{2 \cdot \lambda_{eq}}$$

де P_{ela} , l_{fhav} , l_{Wav} , Q_a , h_{na} , b_{na} , λ_{eq} – з п.п. 13.1; 5.18; 5.19; 4.12; 5.11; 14.1.2;

b_{savis} – сумарна товщина ізоляції лобової частини секції – з п. 5.10.

14.2.5 Середнє перевищення температури обмотки якоря над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\Delta\theta_{aav} = (\Delta\theta_a + \Delta\theta_{an}) \frac{2l_a}{l_{Wav}} + (\Delta\theta_{fha} + \Delta\theta_{isa}) \frac{2l_{fhav}}{l_{Wav}},$$

де $\Delta\theta_a$, $\Delta\theta_{an}$, l_a , l_{Wav} , $\Delta\theta_{fa}$, $\Delta\theta_{isa}$, l_{fhav} – з п.п. 14.2.1; 14.2.2; 3.10; 5.19; 14.2.4; 14.2.3; 5.18.

14.2.6. Втрати, що відводяться, Вт,

$$\Sigma P = P_{ela} + k_{Ead} \cdot (P_{elE} + P_{elad}) + P_{elb} + P_{ad} + P_{mecb} + P_{magta} + P_{magya} + P_{mec},$$

де P_{ela} , P_{elE} , P_{elad} , P_{elb} , P_{ad} , P_{mecb} , P_{magta} , P_{magya} , P_{mec} – з п.п. 13.1; 13.2; 13.3; 13.4; 13.6; 13.9; 13.8; 13.7; 13.5; $k_{Ead} = 0,9$ – для двигунів зі ступенем захисту IP22 і способом охолодження IC01.

14.2.7 Середнє перевищення температури повітря усередині машини над температурою охолодного середовища, °С,

$$\Delta\theta_{air} = \frac{\Sigma P}{\alpha_B \cdot \pi \cdot d_{se} \cdot (l_a + 2 \cdot l_{fha})},$$

де ΣP , d_{se} , l_a , l_{fha} – з п.п. 14.2.6; 3.2; 3.10; 5.17; α_B – з рис. 14.2.

14.2.8 Середнє перевищення температури обмотки якоря над температурою охолодного середовища, °С,

$$\Delta\theta_{Wair} = \Delta\theta_{aav} + \Delta\theta_{air},$$

де $\Delta\theta_{aav}$, $\Delta\theta_{air}$ – з п.п. 14.2.5; 14.2.7.

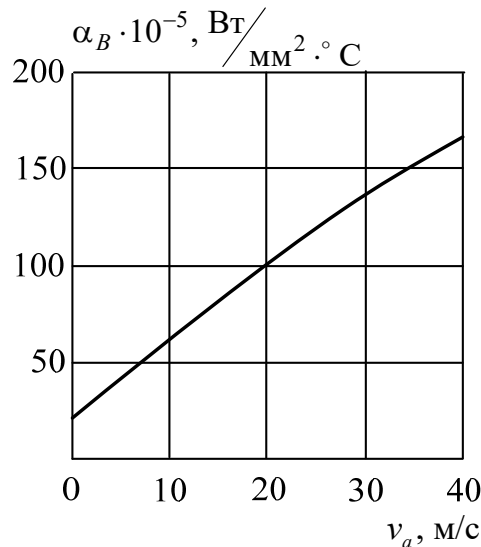


Рисунок 14.2 – Залежність коефіцієнта поверхневої тепловіддачі від окружної швидкості якоря

14.3 Тепловий розрахунок обмотки головних полюсів.

14.3.1 Перевищення температури зовнішньої поверхні охолодження котушки над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\Delta\theta_{Eair} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elE}}{2p \cdot l_{Eav} \cdot (2b_{Ec} + h_{Ec}) \cdot \alpha_C} \quad \text{– для багатошарової обмотки;}$$

$$\Delta\theta_{Eair} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elE}}{2p \cdot l_{Eav} \cdot (N_{Ep} \cdot a_{Eis} + 0,6b_{Eis}) \cdot \alpha_C} \quad \text{– для одношарової обмотки,}$$

де k_{Ead} , P_{elE} , $2p$, l_{Eav} , b_{Ec} , h_{Ec} , N_{Ep} , a_{Eis} , b_{Eis} – з п.п. 14.2.6; 13.2; 3.2; 10.10; 10.6 і 11.20; 10.8; 10.4; α_C – коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої поверхні охолодження котушки збудження (рис. 14.3), v_a з п. 3.7.

14.3.2 Перепад температури в ізоляції котушки головного полюса, °С,

$$\Delta\theta_{Eis} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elE}}{2p \cdot l_{Eav} \cdot (2b_{Ec} + h_{Ec})} \cdot \left[\frac{b_{Eis}}{\lambda_{eq}} + \frac{b_{Ec}}{8\lambda'_{eq}} \right] \quad \text{– для багатошарових обмоток з}$$

проводу круглого перерізу;

$$\Delta\theta_{Eis} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elE}}{2p \cdot l_{Eav} \cdot (2b_{Ec} + h_{Ec})} \cdot \frac{b_{Eis}}{\lambda_{eq}} - \text{для багат шарових обмоток з проводу}$$

прямокутного перерізу;

$$\Delta\theta_{Eis} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elE}}{2p \cdot l_{Eav} \cdot (N_{Ep} \cdot a_{Eis} + 0,6b_{Eis})} \cdot \frac{b_{Eis}}{\lambda_{eq}} - \text{для одношарових обмоток,}$$

де k_{Ead} , P_{elE} , $2p$, l_{Eav} , b_{Ec} , h_{Ec} , N_{Ep} , a_{Eis} , b_{Eis} , λ_{eq} – з п.п. 14.2.6; 13.2; 3.2; 10.10; 11.20; 10.8; 10.4; 14.2.2; $b_{Eis} = 0,2$ мм – товщина ізоляції котушки головного полюса; $\lambda'_{eq} = 70 \cdot 10^5$ Вт(мм²·°С) – коефіцієнт теплопровідності ізоляції провідника.

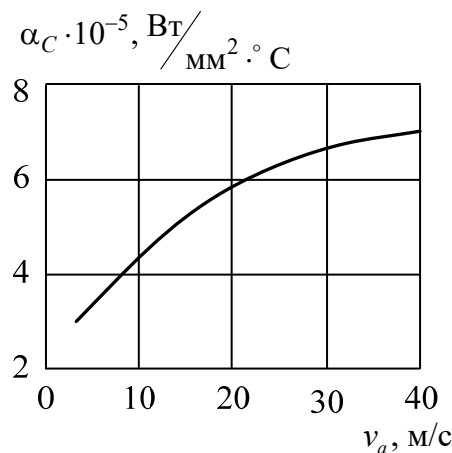


Рисунок 14.3 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі із зовнішньої поверхні охолодження котушки збудження від окружної швидкості якоря

14.3.3 Середнє перевищення температури обмотки збудження над температурою охолодного середовища, °С,

$$\Delta\theta_{Eav} = \Delta\theta_{Eair} + \Delta\theta_{Eis} + \Delta\theta_{air},$$

де $\Delta\theta_{Eair}$, $\Delta\theta_{Eis}$, $\Delta\theta_{air}$ – з п.п. 14.3.1; 14.3.2; 14.2.7.

14.4 Тепловий розрахунок обмотки додаткових полюсів

14.4.1 Перевищення температури зовнішньої поверхні охолодження котушки над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\Delta\theta_{ad air} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elad}}{2p \cdot l_{wadp} \cdot (N_{adp} \cdot a_{ad} + 0,6 \cdot b_{ad})} \cdot \alpha'_C - \text{для одношарової котушки;}$$

$$\Delta\theta_{ad air} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elad}}{2p \cdot l_{wadp} \cdot (2 \cdot b_{cadp} + h_{cadp})} \cdot \alpha_C - \text{для багат шарової котушки,}$$

де k_{Ead} , P_{elad} , $2p$, l_{wadv} , N_{adv} , a_{ad} , b_{ad} – з п.п. 14.2.6; 13.3; 3.2; 11.21; 11.15; 11.19; b_{cadp} , h_{cadp} – ширина і висота котушки додаткового полюса (рис. 11.2 і п. 11.21); $\alpha'_C = 1,7\alpha_C$ – коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої поверхні котушки додаткових полюсів, де α_C – з п. 14.3.1.

14.4.2 Перепад температури в ізоляції котушки додаткового полюса з провідників прямокутного перерізу, °С,

$$\Delta\theta_{adis} = \frac{k_{Ead} \cdot P_{elad}}{2p \cdot l_{wadv} \cdot (2 \cdot b_{cadp} + h_{cadp})} \cdot \frac{b_{dis}}{\lambda_{eq}},$$

де k_{Ead} , P_{elad} , $2p$, l_{wadv} , b_{cadp} , h_{cadp} , λ_{eq} – з п.п. 14.2.6; 13.3; 3.2; 11.21; 11.20; 14.2.2; b_{dis} – однобічна товщина ізоляції котушки, приймається 0,1 мм, бо котушка поверху обмотується (скріплюється) скляною стрічкою товщиною 0,1 мм.

14.4.3 Середнє перевищення температури обмотки додаткових полюсів над температурою охолодного середовища, °С,

$$\Delta\theta_{adav} = \Delta\theta_{adair} + \Delta\theta_{air} \text{ – для одношарової обмотки;}$$

$$\Delta\theta_{adav} = \Delta\theta_{adair} + \Delta\theta_{adis} + \Delta\theta_{air} \text{ – для багатшарової обмотки;}$$

де $\Delta\theta_{adair}$, $\Delta\theta_{adis}$, $\Delta\theta_{air}$ – з п.п. 14.4.1; 14.4.2; 14.2.6.

14.5 Тепловий розрахунок колектора

14.5.1 Перевищення температури зовнішньої поверхні колектора над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\Delta\theta_{esc} = \frac{P_{elb} + P_{mecb}}{\pi \cdot d_c \cdot l_c \cdot \alpha_{col}},$$

де P_{elb} , P_{mecb} , d_c , l_c – з п.п. 13.4; 13.6; 6.1; 6.12; α_{col} – коефіцієнт тепловіддачі поверхні колектора залежно від окружної швидкості колектора v_c , п.6.2 (рис. 14.4).

14.5.2 Перевищення температури колектора над температурою охолодного середовища, °С,

$$\Delta\theta_{cair} = \Delta\theta_{esc} \text{ – для двигунів зі ступенем захисту IP22 і способом охолодження IC01, вхід охолодного повітря, з боку колектора,}$$

де $\Delta\theta_{esc}$ – з п. 14.5.1.

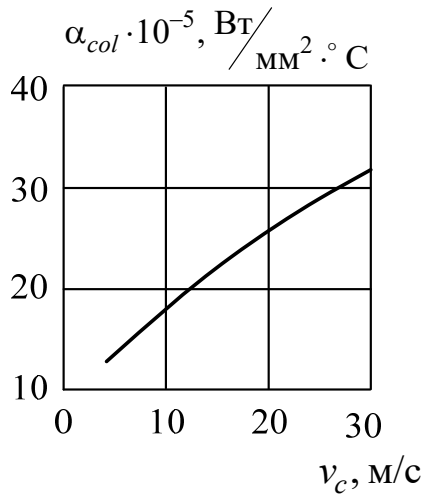


Рисунок 14.4 – Коефіцієнт тепловіддачі поверхні колектора залежно від його окружної швидкості

15 ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК

15.1 Зовнішній діаметр вентилятора, мм (рис. 15.1)

$$d_{ve} = (0,8 - 0,9) \cdot (d_{se} - 2 \cdot h_{ys}),$$

де d_{se} , h_{ys} – з п.п. 3.2; 11.20.

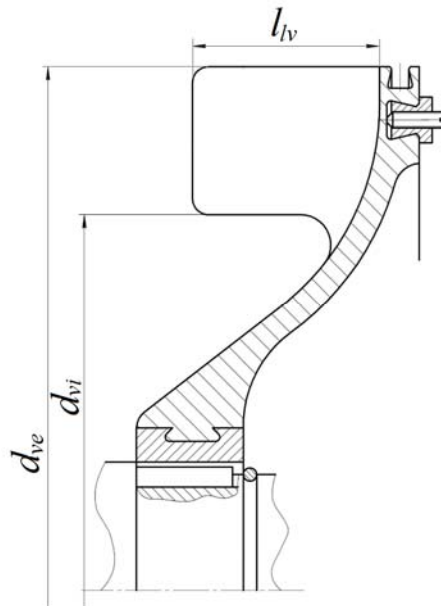


Рисунок 15.1 – Конструктивні розміри вентилятора

15.2 Внутрішній діаметр колеса вентилятора, мм,

$$d_{vi} = (0,62 - 0,67) \cdot (d_{se} - 2 \cdot h_{ys}),$$

де d_{se} , h_{ys} – з п.п. 3.2; 11.20.

15.3 Довжина лопатки вентилятора, мм,

$$l_{lv} = (0,12 - 0,15) \cdot d_{ve}.$$

15.4 Кількість лопаток вентилятора

$$n_{lv} = \frac{d_{ve}}{20},$$

де d_{ve} – з п.15.1.

15.5 Лінійна швидкість вентилятора по зовнішньому діаметру, м/с,

$$v_{ve} = \frac{\pi \cdot d_{ve} \cdot n_N}{6 \cdot 10^4},$$

де d_{ve} , n_N – з п.п. 15.1; 2.3.

15.6 Лінійна швидкість вентилятора по внутрішньому діаметру, м/с,

$$v_{vi} = \frac{\pi \cdot d_{vi} \cdot n_N}{6 \cdot 10^4},$$

де d_{vi} , n_N – з п.п. 15.2; 2.3.

15.7 Натиск вентилятора при неробочому ході, Па,

$$h_o = \eta_{ao} \cdot \gamma_{air} \cdot (v_{ve}^2 - v_{vi}^2),$$

де $\eta_{ao}=0,6$ – аеродинамічний ККД вентилятора при неробочому ході;

$\gamma_{air}=1,23 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря; v_{ve} , v_{vi} – з п.п. 15.5; 15.6.

15.8 Площа поперечного перерізу вхідних отворів вентилятора, м²,

$$S_{vin} = 0,92 \cdot \pi \cdot d_{ve} \cdot l_{lv} \cdot 10^{-6},$$

де d_{ve} , l_{lv} – з п.п. 15.1; 15.3.

15.9 Максимальна витрата повітря, м³/с,

$$q_{vmax} = 0,42 \cdot v_{ve} \cdot S_{vin},$$

де v_{ve} , S_{vin} – з п.п. 15.5; 15.8.

15.10 Дійсна витрата повітря, м³/с,

$$q_{vre} = q_{vmax} \cdot \sqrt{\frac{h_o}{h_o + z_r \cdot q_{vmax}^2}},$$

де q_{vmax} , h_o – з п.п. 15.9; 15.7; z_r – еквівалентний аеродинамічний опір повітропроводу машини вибирається з рис. 15.2.

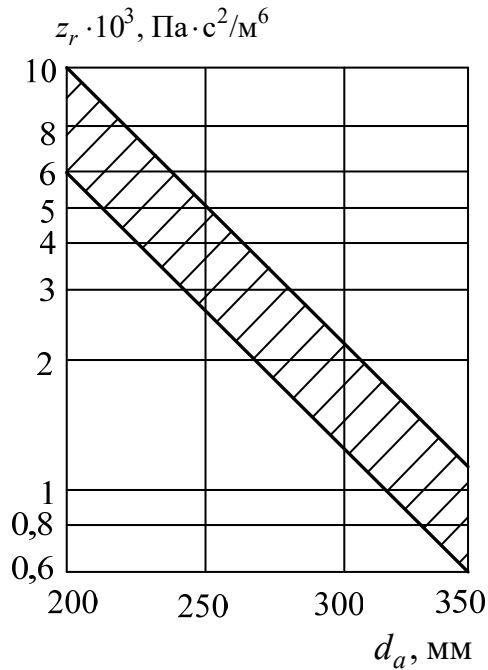


Рисунок 15.2 – Еквівалентний аеродинамічний опір повітропроводу машини

15.11 Дійсний натиск вентилятора, Па,

$$h_{re} = \frac{h_o \cdot z_r \cdot q_{vmax}^2}{h_o + z_r \cdot q_{vmax}^2},$$

де h_o , z_r , q_{vmax} – з п.п. 15.7; 15.10; 15.9.

15.12 Необхідна витрата повітря, м³/с,

$$q_{vnom} = \frac{\Sigma P}{c_v \cdot \Delta\theta_v}; \quad \Delta\theta_v = 2 \cdot \Delta\theta_c; \quad \Delta\theta_c = \Delta\theta_{air},$$

де ΣP , $\Delta\theta_{air}$ – з п.п. 14.2.6, 14.2.7; $c_v = 1100$ Дж/с·м³ – теплоємність повітря;

$\Delta\theta_v$ – перевищення температури повітря, що виходить, над тим, що входить.

$\Delta\theta_c$ – середнє перевищення температури повітря усередині машини над температурою охолодного середовища, °С.

Якщо $q_{vre} < q_{vnom}$ (п. 15.10), то необхідно повторити розрахунок з п. 15.1, змінивши вибрані параметри системи вентиляції.

16 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА

16.1 До робочих характеристик ДПС відносяться залежності $n, M, P_{in}, I_a, \eta(P)$ при номінальних напрузі U_N і струмі збудження I_{EN} , де n – частота обертання; M – обертальний момент; P_{in} – вхідна потужність; I_a – струм обмотки якоря; η – ККД; P – вихідна корисна потужність на валу.

Механічною характеристикою двигуна є залежність $n(M)$ при тих самих параметрах U_N і I_{EN} .

Розрахунок характеристик проводиться для декількох значень коефіцієнта навантаження $\beta_{Ia} = I_a / I_{aN}$ (п. 13.12). Результати розрахунку характеристик двигунів незалежного та паралельного збудження заносяться до табл. 16.1.

Таблиця 16.1 – Дані робочих характеристик ДПС незалежного та паралельного збудження

Розрахункові величини	Одиниці вимірювання	Розрахункові значення					
		0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
β_{Ia} (п. 16.1)	в.о.	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
I_a (п. 16.3)	А						
Φ (п. 16.8.1)	Вб						
E_a (п. 16.8.2)	В						
n (п. 16.8.3)	об/хв						
P_{in} (п. 16.8.4)	Вт						
P (п. 16.8.6)	Вт						
M (п. 16.8.7)	Н·м						
η (п. 16.8.8)	в. о.						

16.2 Для визначення змін електромагнітних величин через поперечну реакцію якоря при зміні струму якоря використовується метод на тій же основі, що і в п. 9.3, для чого знов на рис. 16.1 побудована перехідна магнітна характеристика $B_\delta(F_{\delta a})$, де $F_{\delta a} = \left(\frac{F_\delta + F_{Ia} + F_{ya}}{2} \right)$. Але тепер замість лінії рівня магнітної індукції $B_{\delta nom}$ (рис. 9.1) використовується лінія рівня магнітної індукції $B_{\delta NI}$, яка має бути розрахована.

де $P_{ino} = P_{mecb} + P_{magta} + P_{magya} + P_{mec}$ – втрати неробочого ходу, які складаються з P_{mecb} , P_{magta} , P_{magya} , P_{mec} за п.п. 13.6, 13.7, 13.8, 13.9; U_N з п.2.2.

16.4 Розрахунки робочих характеристик починаються із визначення МРС поперечної реакції якоря на половину полюсної дуги, A ,

$$F_{ra} = \frac{1}{2} \cdot \beta_{Ia} \cdot b_{pe} \cdot A,$$

де b_{pe} , A – п.п. 3.12; 4.14.

16.5 Значення F_{ra} відкладаються на осі МРС $F_{\delta a}$ (рис.16.1) у два боки від точки $F_{\delta a Nl}$, і тут знаходяться точки з відповідними МРС

$$F_a = F_{\delta a Nl} - F_{ra}; \quad F_d = F_{\delta a Nl} + F_{ra}.$$

Від цих точок угору проводяться лінії, і на їхніх перетинах з перехідною характеристикою та лінією рівня магнітної індукції $B_{\delta Nl}$ утворюються пари точок b , a та d , c . Трикутник $abNl$ характеризує підмагнічувальну дію реакції якоря, трикутник $cdNl$ – розмагнічувальну дію. Подальші розрахунки спрямуються на визначення їхньої результуючої дії.

16.6 Відрізок ad (рис. 16.1) розділяється на k_F рівномірних інтервалів, які мають ширину $\Delta F = 2F_{ra} / k_F$. У середині кожного інтервалу ΔF проводиться умовні вектори зміни магнітної індукції ΔB_k . У межах bNl на спадній частини перехідній характеристики значення ΔB_k (у Тл) беруться від'ємними, у межах cNl на висхідній частини – додатними.

Після визначення значень ΔB_k на усіх k_F інтервалах розраховується середнє значення зміни магнітної індукції

$$\Delta B_{\delta av} = \frac{1}{k_F} \sum_{k=1}^{k_F} \Delta B_k,$$

яке, природно, виходить від'ємним.

16.7 У підсумку отримується середнє значення магнітної індукції, Тл, у проміжку під головними полюсами при поточному значення струму якоря

$$B_{\delta av} = B_{\delta Nl} + \Delta B_{\delta av},$$

причому при неробочому ході, тобто при $\beta_{Ia}=0$, можна взяти $B_{\delta av} = B_{\delta Nl}$.

16.8 Далі для кожного поточного значення струму якоря I_a визначається низка потрібних для робочих характеристик величин, а саме:

16.8.1 Магнітний потік у повітряному проміжку, Вб,

$$\Phi_{\delta av} = b_{pe} \cdot l_{Fe} \cdot B_{\delta av} \cdot 10^{-6},$$

де $B_{\delta av}$, b_{pe} , l_{Fe} – з п.п. 16.7; 3.12; 3.4.

16.8.2 ЕРС обмотки якоря, В,

$$E_a = U_N - I_a \cdot R_{a\Sigma},$$

де сумарний опір якірного кола при незалежному і паралельному збудженні, Ом,

$$R_{a\Sigma} = R_a + R_{ad} + \frac{2\Delta U_b}{I_{aN}},$$

де U_N , I_{aN} , R_a , R_{ad} , $2\Delta U_b$, – з п.п. 2.2; 3.15; 5.20; 11.22; 6.7.

16.8.3 Частота обертання якоря двигуна, об/хв,

$$n = \frac{60 \cdot E_a \cdot a}{p \cdot z_a \cdot \Phi_{\delta av}},$$

де E_a , a , p , z_a , $\Phi_{\delta av}$ – з п.п. 16.8.2; 4.1; 3.2; 4.13; 16.8.1.

16.8.4 Потужність, що підводиться до двигуна (з урахуванням втрат в обмотці збудження), Вт,

$$P_{in} = U_N \cdot I_a + P_{elE},$$

де U_N , P_{elE} – з п.п. 2.2; 13.2.

16.8.5 Електромагнітна потужність в якорі двигуна, Вт,

$$P_{em} = E_a \cdot I_a,$$

де E_a з п. 16.8.2.

16.8.6 Вихідна потужність на валу (при $\beta_{Ia}=0$ треба прийняти $P=0$), Вт,

$$P = P_{em} - P_{ino} - \beta_{Ia}^2 \cdot P_{ad},$$

де P_{ad} , P_{ino} , P_{em} з п.п. 13.5, 16.3, 16.8.5.

16.8.7 Обертальний момент на валу двигуна, Н·м,

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n},$$

де n , P з п.п. 16.8.3; 16.8.6.

16.8.8 Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P}{P_{in}}.$$

де P_{in} , P з п.п. 16.8.4; 16.8.6.

16.9 Побудувати робочі характеристики n , M , P_{in} , I_a , $\eta(P)$ і механічну характеристику $n(M)$ двигуна.

Типовий вигляд характеристик для двигунів незалежного та паралельного збудження наданий на рис. 16.2. Хоча треба зауважити, що при відсутності стабілізуючої обмотки на головних полюсах частота обертання n при збільшенні струму якоря може почати збільшуватися через зменшення магнітного потоку під дією реакції якоря.

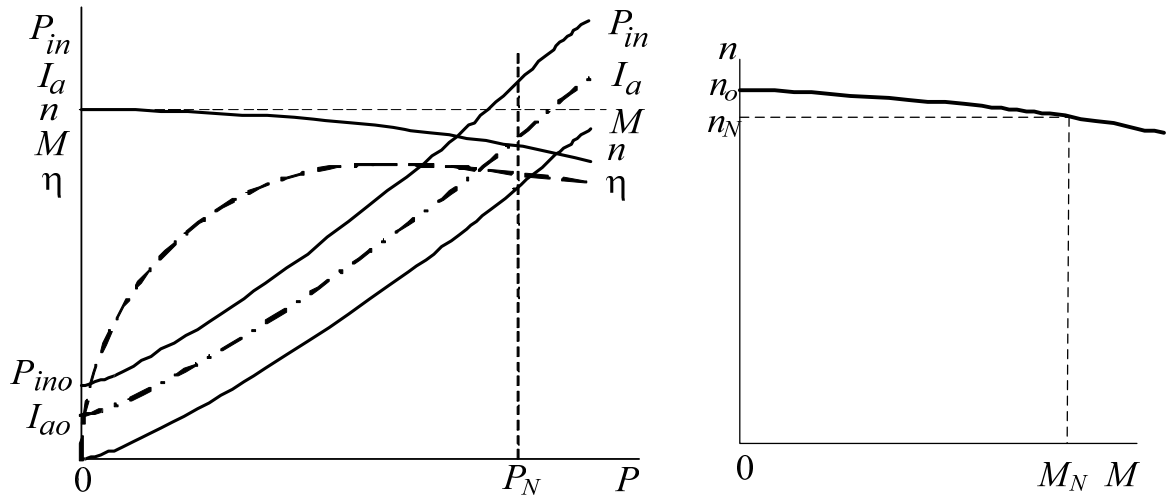


Рисунок 16.2 – Вигляд робочих та механічної характеристик двигунів незалежного і паралельного збудження

Повнофакторна побудова робочих характеристик двигунів незалежного та паралельного збудження надана на рис. 16.3, механічної характеристики – на рис. 16.4.

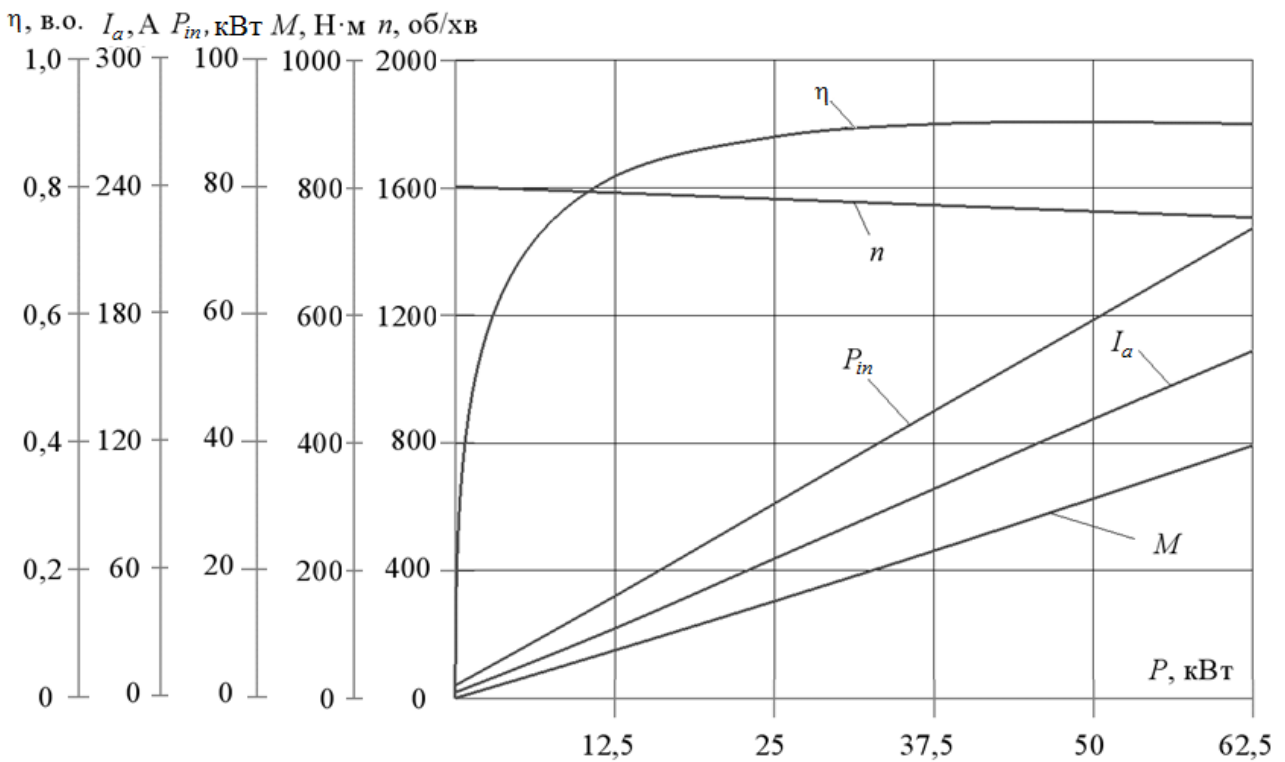


Рисунок 16.3 – Зразок повнофакторної побудови робочих характеристик двигунів незалежного та паралельного збудження

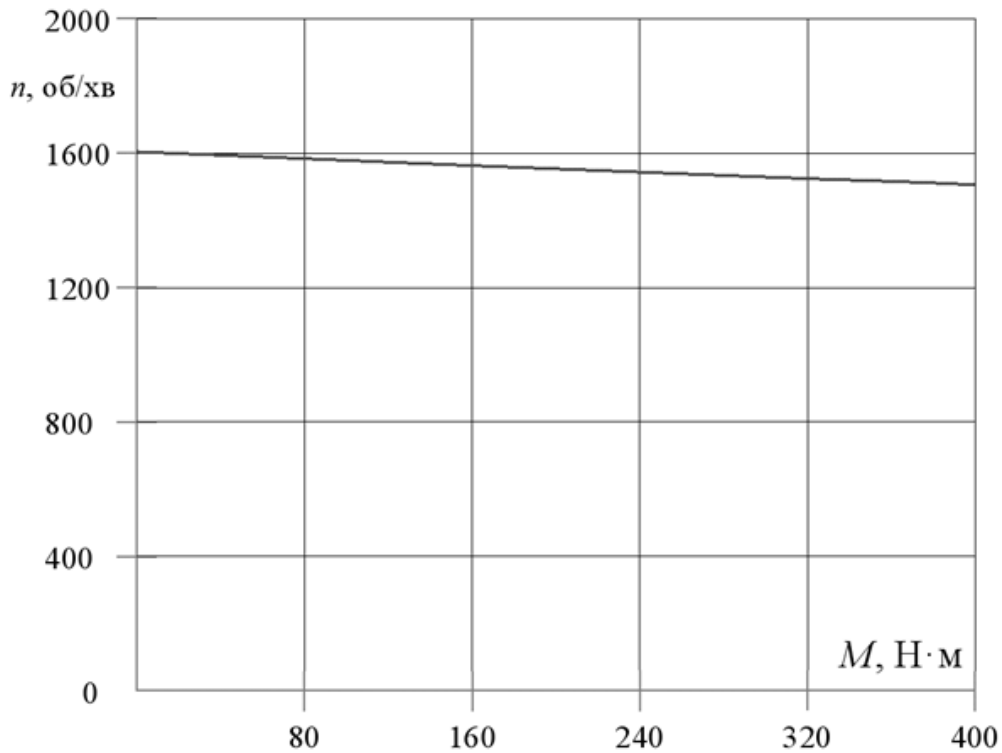


Рисунок 16.4 – Приклад побудови механічної характеристики ДПС двигунів незалежного та паралельного збудження

16.10 Розрахунок робочих характеристик $n, M, P_{in}, I_a, \eta(P)$ та механічної характеристики $n(M)$ двигуна постійного струму з **послідовним збудженням** відбувається за окремою методикою і подається далі за текстом. Назви величин тут такі саме, як і в п. 16.1 при незалежному або паралельному збудженні, але при послідовному збудженні приймається незмінною тільки напруга, яка дорівнює номінальній напрузі U_N . Проте струм збудження I_E вже не може підтримуватися номінальним, тому що він змінюється разом зі струмом якоря ($I_E = I_a$).

Цей розрахунок виконується також для декількох значень коефіцієнта навантаження $\beta_{Ia} = I_a / I_{aN}$ (п. 16.1), але ці значення починаються з 0,25, тому що при такому збудженні двигуни не можна використовувати без навантаження.

Результати розрахунку характеристик двигуна послідовного збудження заносяться до табл. 16.2.

Слід знати, що повнофакторний розрахунок характеристик ДПС з послідовним збудженням є доволі трудомістким через те, що частота обертання його якоря при зміні навантаження суттєво змінюється (див. далі. рис. 16.5). Тому при розрахунку кожної точки характеристик треба перераховувати механічні P_{mecb} , P_{mec} та магнітні P_{magta} , P_{magya} втрати (див. п.п. 13.6, 13.7, 13.8, 13.9) через зміну

власне частоти обертання і відповідну зміну частоти перемагнічування якоря (п. 3.8), а також через зміну магнітної індукції в осерді якоря, яка відбувається через зміну магнітних індукції і потоку і повітряному проміжку на поверхні якоря.

Таблиця 16.2 – Дані робочих характеристик двигуна послідовного збудження

Розрахункові величини	Одиниці вимірювання	Розрахункові значення				
β_{Ia} (п. 16.10)	в.о.	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
I_a (п. 16.11)	А					
E_a (п. 16.11)	В					
F_E (п. 16.12)	А					
Φ' (п. 16.13)	Вб					
B'_δ (п. 16.14)	Тл					
F_{qd} (п. 16.15)	А					
F'_E (п. 16.16)	А					
Φ (п. 16.17)	Вб					
n (п. 16.18)	об/хв					
P_{in} (п. 16.19)	Вт					
P (п. 16.21)	Вт					
M (п. 16.22)	Н·м					
η (п. 16.23)	в. о.					

16.11 Визначити ЕРС обмотки якоря, В,

$$E_a = U_N - I_a \cdot R_{a\Sigma},$$

де поточне значення струму якоря

$$I_a = \beta_{Ia} \cdot I_{aN};$$

сумарний опір якорного кола для послідовного збудження, Ом,

$$R_{a\Sigma} = R_a + R_{ad} + R_E + \frac{2\Delta U_b}{I_{aN}},$$

де U_N , I_{aN} , R_a , R_{ad} , R_E , $2\Delta U_b$, – з п.п. 2.2; 3.15; 5.20; 11.22; 10.11; 6.7.

16.12 МРС обмотки збудження як така в первісному її розумінні, А,

$$F_E = I_a \cdot N_E,$$

де N_E , I_a – з п.п. 10.9; 16.11.

16.13 Магнітний потік Φ' від МРС F_E визначається за магнітною характеристикою $\Phi(F_o)$ (п. 8.23).

16.14 Магнітна індукція в повітряному проміжку, Тл,

$$B'_\delta = \frac{\Phi' \cdot 10^6}{b_{pe} \cdot l_{Fe}},$$

де l_{Fe} , b_{pe} , Φ' – з п.п. 3.4; 3.12; 16.13.

16.15 Для визначення розмагнічувальної МРС поперечної реакції якоря F_{qd} використовується метод за п. 9.3. Точка N (рис. 9.1) визначається за перехідною характеристикою $B'_\delta \left(\frac{F'_\delta + F'_{ta} + F'_{ya}}{2} \right)$ для магнітної індукції B'_δ .

16.16 Умовна частка від МРС F_E обмотки збудження, яка залишається для створення магнітного потоку у проміжку, А,

$$F'_E = F_E - F_{qd},$$

де F_E , F_{qd} – з п.п. 16.12; 16.15.

16.17 За магнітною характеристикою $\Phi(F_o)$ (п. 8.23) для F'_E визначити магнітний потік Φ , Вб.

16.18 Частота обертання двигуна, об/хв,

$$n = \frac{60 \cdot E_a \cdot a}{p \cdot z_a \cdot \Phi},$$

де p , a , z_a , E_a , Φ – з п.п. 3.2; 4.1; 4.13; 16.11; 16.17.

16.19 Потужність що підводиться до двигуна, Вт,

$$P_{in} = U_N \cdot I_a,$$

де U_N , I_a – з п.п. 2.2; 16.11.

16.20 Електромагнітна потужність в якорі двигуна, Вт,

$$P_{em} = E_a \cdot I_a,$$

де E_a з п. 16.11.

16.21 Вихідна потужність, що віддається з вала двигуна, Вт,

$$P = P_{em} - P_{mecb} - P_{magta} - P_{magya} - P_{mec} - \beta_{Ia}^2 \cdot P_{ad},$$

де P_{ad} , P_{mecb} , P_{magta} , P_{magya} , P_{mec} , P_{em} за п.п. 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 13.9, 16.20.

16.22 Обертальний момент на валу двигуна, Н·м,

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n},$$

де n , P – з п.п. 16.18; 16.21.

16.23 Коефіцієнт корисної дії двигуна

$$\eta = \frac{P}{P_{in}}.$$

де P_{in}, P з п.п. 16.19; 16.21.

16.24 Побудувати робочі характеристики $n, M, P_{in}, I_a, \eta(P)$ та механічну характеристику $n(M)$ двигуна послідовного збудження.

Загальний вигляд характеристик для двигунів послідовного збудження на- дано на рис. 16.5.

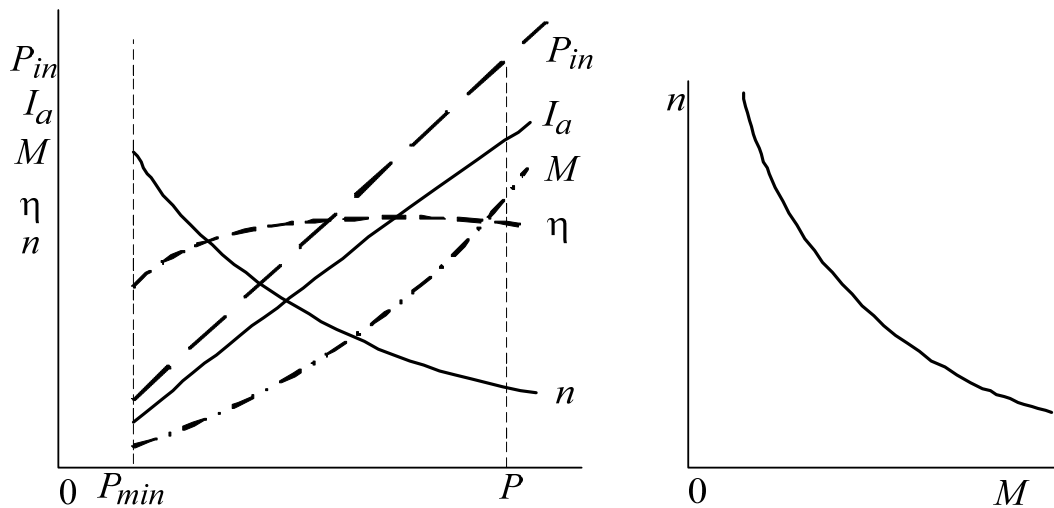


Рисунок 16.5 – Вигляд робочих та механічної характеристик двигуна послідовного збудження

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Двигуни постійного струму: навчально-методичний посібник з курсового проектування [для студентів електромашинобудівного факультету] / М. О. Осташевський [та ін.] – Х.: ХДПУ, 1997. – 67 с.

2 Мілих В. І., Шайда В.П., Юр'єва О.Ю. Конструювання двигунів постійного струму: навч.-методичний посібник [для студ. спеціальності «Електрична інженерія»]. За ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А.М., 2025. – 68 с.

3 Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Ципленков, О. Б. Іванов, О. В. Бобров, В. В. Кузнецов, В. В. Артемчук, М. О. Баб'як; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.

4 Мілих В.І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. За ред. В. І. Мілих. – 4-е вид – К. : «Каравела», 2022. – 688 с.

5 Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / За ред. В. І. Мілих. – 2-е вид – К. : «Каравела», 2023. – 482 с.

6 Юхимчук В. Д. Технологія виробництва електричних машин: підручник. – Х. : Тім Пабліш Груп, 2014. – 750 с.

7 Літерні позначення величин та параметрів електричних машин: методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» для студентів і викладачів електротехнічних спеціальностей / Укладач В. І. Мілих. – Х. : НТУ «ХПІ», 2007. – 28 с.

8 СТЗВО-ХПІ-2.01-2025. Випускні кваліфікаційні роботи. Загальні вимоги до виконання. Чинний від 02.01.2025 р.

9 СТЗВО-ХПІ-3.01-2025. Текстові документи у сфері навчального процесу. Загальні вимоги до виконання. Чинний від 21.02.2025 р.

10 Мілих В. І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях : підручник / В. І. Мілих. К.: Каравела, 2020. 396 с.

11 Finite Element Method Magnetics: Download – Finite Element Method Magnetics – Stable Distribution (21Apr2019) – 64-bit Executable. Режим доступу: <https://www.femm.info/wiki/Download> (Дата звертання: 22.07.2024).

Додаток А
(довідковий)
ОБМОТУВАЛЬНІ ПРОВІДИ

Таблиця А.1 – Розміри і площі поперечного перерізу прямокутного проводу

Номіналь- ний розмір по біль- шому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,06	1,12	1,18	1,25
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
2,0	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285
2,12	1,559	–	1,734	–	1,905	–	2,160	–	2,435
2,24	1,665	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585
2,36	1,751	–	1,950	–	2,145	–	2,429	–	2,735
2,5	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910
2,65	1,983	–	2,211	–	2,435	–	2,753	–	3,098
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285
3,0	2,263	–	2,526	–	2,785	–	3,145	–	3,535
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723
3,35	2,543	–	2,841	–	3,135	–	3,537	–	3,973
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223
3,75	2,863	–	3,201	–	3,535	–	3,985	–	4,473
4,0	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785
4,25	3,263	–	3,651	–	4,035	–	4,545	–	5,098
4,5	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410
4,75	3,663	–	4,101	–	4,535	–	5,105	–	5,723
5,0	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035
5,3	4,103	–	4,596	–	5,085	–	5,721	–	6,410
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785
6,0	4,663	–	5,226	–	5,785	–	6,505	–	7,285
6,3	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660
6,7	–	–	5,856	–	6,485	–	7,289	–	8,160

Продовження таблиці А.1

Номіналь- ний роз- мір по бі- льшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,12
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
2,0	2,425	2,585	–	–	–	–	–	–	–
2,12	–	2,753	–	–	–	–	–	–	–
2,24	2,742	2,921	3,145	3,369	–	–	–	–	–
2,36	–	3,089	–	3,561	–	–	–	–	–
2,5	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	–	–	–
2,65	–	3,495	–	4,025	–	4,407	–	–	–
2,8	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	–
3,0	–	3,985	–	4,585	–	5,038	–	5,638	–
3,15	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	–	4,475	–	5,145	–	5,667	–	6,337	–
3,55	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	–	5,035	–	5,785	–	6,387	–	7,137	–
4,0	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	–	5,735	–	6,585	–	7,287	–	8,137	–
4,5	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	–	6,435	–	7,385	–	8,188	–	9,137	–
5,0	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3	–	7,205	–	8,265	–	9,177	–	10,24	–
5,6	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,0	–	8,185	–	9,385	–	10,44	–	11,64	–
6,3	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7	–	9,165	–	10,51	–	11,70	–	13,04	–
7,1	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5	–	10,29	–	11,79	–	13,14	–	14,64	–
8,0	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,5	–	11,69	–	13,39	–	14,94	–	16,64	–
9,0	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	–	13,09	–	14,99	–	16,74	–	18,64	–
10,0	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	–	14,63	–	16,75	–	18,72	–	20,84	–
11,2	–	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38
11,8	–	–	–	18,67	–	20,88	–	23,24	–
12,5	–	–	–	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Продовження таблиці А.1

Номіналь- ний роз- мір по бі- льшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3,0	3,15	3,35	3,55
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
3,15	6,693	–	–	–	–	–	–	–	–
3,35	7,141	–	–	–	–	–	–	–	–
3,55	7,589	7,829	8,326	–	–	–	–	–	–
3,75	8,037	–	8,826	–	–	–	–	–	–
4,0	8,597	8,891	9,451	10,05	10,85	–	–	–	–
4,25	9,157	–	10,08	–	11,35	–	–	–	–
4,5	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	–	–
4,75	10,28	–	11,33	–	12,75	–	14,41	–	–
5,0	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20
5,3	11,51	–	12,70	–	14,29	–	16,15	–	18,27
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33
6,0	13,08	–	14,45	–	16,25	–	18,35	–	20,75
6,3	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82
6,7	14,65	–	16,20	–	18,21	–	20,56	–	23,24
7,1	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66
7,5	16,44	–	18,20	–	20,45	–	23,08	–	26,08
8,0	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85
8,5	18,68	–	20,70	–	23,25	–	26,23	–	29,63
9,0	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40
9,5	20,92	–	23,20	–	26,05	–	29,38	–	33,18
10,0	22,04	23,05	24,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95
10,8	23,38	–	25,95	–	29,13	–	32,84	–	37,08
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21
11,8	26,07	–	28,95	–	32,49	–	36,62	–	41,34
12,5	27,64	28,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83
13,2	–	–	–	–	–	–	–	–	46,31
14,0	–	–	–	–	–	–	–	46,35	49,15
15,0	–	–	–	–	–	–	–	–	52,70
16,0	–	–	–	–	–	–	–	53,05	56,25

Продовження таблиці А.1

Номіналь- ний роз- мір по бі- льшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	3,75	4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,3	5,6	6,0
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
5,6	20,14	21,54	–	–	–	–	–	–	–
6,0	–	23,14	–	–	–	–	–	–	–
6,3	22,77	24,34	25,92	27,49	–	–	–	–	–
6,7	–	25,94	–	29,29	–	–	–	–	–
7,1	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	–	–	–
7,5	–	29,14	–	32,89	–	36,64	–	–	–
8,0	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94	–
8,5	–	33,14	–	37,39	–	41,64	–	46,74	–
9,0	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54	–
9,5	–	37,14	–	41,89	–	46,64	–	52,34	–
10,0	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14	–
10,8	–	41,54	–	46,84	–	52,14	–	58,50	–
11,2	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86	–
11,8	–	46,34	–	52,24	–	58,14	–	65,22	–
12,5	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14	–
13,2	–	51,94	–	58,54	–	65,14	–	73,06	–
14,0	51,95	55,14	58,64	62,14	65,64	69,14	73,34	77,54	–
15,0	–	59,14	–	66,64	–	74,14	–	83,14	–
16,0	59,14	63,14	67,14	71,14	75,14	79,14	83,94	88,74	95,14

Продовження таблиці А.1

Номіна- льний ро- змір по більшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
16,8	58,82	63,36	68,02	73,06	78,10	84,82	91,54	99,94	
18,0	63,06	67,92	72,94	78,34	83,74	90,94	98,14	107,14	
18,0	63,06	67,92	72,94	78,34	83,74	90,94	98,14	107,14	
19,5	68,35	73,62	79,09	84,94	90,79	98,59	106,39	116,14	
22,0	77,18	83,12	89,34	95,94	102,54	111,34	120,14	131,14	
25,0	87,77	94,52	101,64	109,14	116,40	126,64	136,64	149,14	
26,3	92,36	99,46	106,97	114,86	122,75	133,27	143,79	156,94	
28,0	–	105,92	113,94	122,34	130,74	141,94	153,14	167,14	
30,0	–	113,52	122,14	131,14	140,14	152,14	164,14	–	
32,0	–	–	130,34	139,94	149,54	162,34	175,14	–	

Продовження таблиці А.1

Номінальний розмір по більшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм						
	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,5
	Площа розрахункового перерізу, мм ²						
10,8	–	–	–	96,34	–	–	–
11,6	–	–	–	103,54	–	–	–
12,5	–	–	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,5	–	93,64	107,14	120,64	–	–	–
14,5	93,39	100,64	115,14	129,64	–	–	–
15,6	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	–	–
16,0	–	–	127,14	–	–	–	–
16,8	108,34	116,74	133,54	–	–	–	–
18,0	116,14	125,14	143,14	–	–	–	–
19,5	125,89	135,64	155,14	–	–	–	–
20,0	–	–	159,14	–	–	–	–
22,0	142,14	153,14	–	–	–	–	–
25,0	161,64	174,14	–	–	–	–	–
26,3	170,09	183,24	–	–	–	–	–
28,0	181,14	195,14	–	–	–	–	–

Таблиця А.2 – Максимальна двобічна товщина ізоляції обмотувальних проводів прямокутного перерізу марок ПСД, ПСДК, мм

Номінальні розміри проводів, мм									
Δa_{is} – по меншому боку			Δb_{is} – по більшому боку						
від 0,90 до 2,00	від 2,10 до 3,80	від 4,00 до 5,60	від 2,10 до 2,50	від 2,63 до 3,35	від 3,53 до 4,50	від 4,70 до 5,60	від 5,90 до 7,10	від 7,40 до 8,00	від 8,50 до 12,50
0,27	0,33	0,4	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48

Примітка: провід, ізольований двошаровим обмотуванням скловолокном з підклеюванням і просочуванням кожного шару: ПСД – нагрівостійким лаком; ПСДК – кремнійорганічним лаком.

Таблиця А.3 – Розміри та площі поперечного перерізу електричних шин

Номіналь- ний роз- мір по бі- льшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	1,25	1,35	1,45	1,50	1,56	1,68	1,81	1,95	2,00
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
11,6	14,2	–	–	–	–	–	–	–	–
12,5	15,3	16,5	–	–	–	–	–	–	–
13,5	16,5	17,8	19,1	–	–	–	–	–	–
14,5	17,9	19,2	20,6	–	22,1	–	–	–	–
15,6	19,2	20,7	22,2	–	23,8	25,6	–	–	–
16,0	–	–	–	23,5	–	–	–	–	–
16,8	20,7	22,3	23,9	–	25,7	27,6	29,7	–	–
18,0	22,2	23,9	25,7	–	27,6	29,6	31,9	34,3	–
19,5	24,0	25,9	27,9	–	29,9	32,2	34,6	37,2	–
20,0	–	–	–	29,5	–	–	–	–	39,1
22,0	27,2	29,3	31,5	–	33,8	36,4	39,1	42,1	–
25,0	30,9	33,4	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1
26,3	32,5	35,1	37,7	–	40,5	43,6	46,9	50,5	–
28,0	34,7	37,4	40,2	–	43,2	46,4	50,0	53,8	–
30,0	37,2	40,1	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1
32,0	39,7	42,8	46,0	–	49,4	53,2	57,2	61,6	–
35,0	43,4	46,9	50,3	–	54,1	58,2	62,7	67,4	–
40,0	49,7	53,6	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1
45,0	55,9	60,4	64,8	–	69,7	75,0	80,8	86,9	–
50,0	62,2	67,1	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1
55,0	–	–	–	–	85,3	91,8	98,9	106,4	–
60,0	74,7	80,6	86,6	–	93,1	100,2	107,9	116,2	–

Продовження таблиці А.3

Номіналь- ний роз- мір по бі- льшому боку, мм	Номінальний розмір по меншому боку, мм								
	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63	2,83	3,00	3,28	3,53
	Площа розрахункового перерізу, мм ²								
19,5	40,0	–	–	–	–	–	–	–	–
22,0	45,3	48,6	52,4	–	–	–	–	–	–
25,0	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	–	–	–	–
26,3	54,3	58,3	62,8	–	67,7	72,7	–	–	–
28,0	57,9	62,2	67,0	–	72,2	77,5	82,1	–	–
30,0	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	96,1	–
32,0	66,3	71,3	76,8	–	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35,0	72,6	78,0	84,1	–	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40,0	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45,0	93,6	100,6	108,5	–	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47,0	–	–	113,4	–	–	–	–	–	–
50,0	104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
55,0	114,6	123,2	132,9	–	142,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60,0	125,1	134,5	145,1	–	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1

Таблиця А.4 – Діаметр і площі поперечного перерізу круглих мідних емальованих проводів марок ПЭТВ, ПЭТ- 155, ПСД, ПСДК

Номінальний ді- аметр неізолюва- ного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного проводу, мм		Площа попереч- ного перерізу неізо- люваного проводу, мм ²
	марки		
	ПЭТВ, ПЭТ-155	ПСД, ПСДК	
0,08	0,100	–	0,00502
0,09	0,110	–	0,00636
0,10	0,122	–	0,00785
0,11	0,132	–	0,00950
0,12	0,142	–	0,01131
0,13	0,152	–	0,01327
0,14	0,162	–	0,01539
0,15	0,180	–	0,01767
0,16	0,190	–	0,02010
0,17	0,200	–	0,02270
0,18	0,210	–	0,02550
0,19	0,220	–	0,02840

Продовження таблиці А.4

Номінальний діаметр неізолюваного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного проводу, мм		Площа поперечного перерізу неізолюваного проводу, мм ²
	марки		
	ПЭТВ, ПЭТ-155	ПСД, ПСДК	
0,20	0,230	–	0,03140
0,21	0,240	–	0,03460
0,23	0,265	–	0,04150
0,25	0,285	–	0,04910
0,27	0,305	–	0,05730
0,29	0,325	–	0,06610
0,31	0,350	0,50	0,07550
0,33	0,365	0,57	0,08550
0,35	0,390	0,59	0,09620
0,38	0,420	0,62	0,11340
0,41	0,450	0,65	0,1320
0,44	0,480	0,68	0,1521
0,47	0,510	0,71	0,1735
0,49	0,530	0,73	0,1886
0,51	0,565	0,77	0,2040
0,53	0,585	0,79	0,2210
0,55	0,605	0,81	0,2380
0,57	0,625	0,83	0,2550
0,59	0,645	0,85	0,2730
0,62	0,675	0,88	0,3020
0,64	0,700	0,90	0,3220
0,67	0,730	0,93	0,3530
0,69	0,750	0,95	0,3740
0,72	0,780	0,99	0,4070
0,74	0,805	1,01	0,4300
0,77	0,835	1,04	0,4660
0,80	0,865	1,07	0,5030
0,83	0,895	1,10	0,5410
0,86	0,925	1,13	0,5810
0,90	0,965	1,17	0,6360
0,93	0,995	1,20	0,6790
0,96	1,025	1,23	
1,00	1,080	1,29	
1,04	1,120	1,33	
1,08	1,160	1,37	
1,12	1,200	1,41	

Продовження таблиці А.4

Номінальний діаметр неізолюваного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюваного проводу, мм		Площа поперечного перерізу неізолюваного проводу, мм ²
	марки		
	ПЭТВ, ПЭТ-155	ПСД, ПСДК	
1,16	1,240	1,45	1,0570
1,20	1,280	1,49	1,1310
1,25	1,330	1,54	1,2270
1,30	1,385	1,59	1,3270
1,35	1,435	1,64	1,4310
1,40	1,485	1,69	1,5390
1,45	1,535	1,74	1,6510
1,50	1,585	1,79	1,7670
1,56	1,645	1,85	1,9110
1,62	1,705	1,91	2,0600
1,68	1,765	1,97	2,2200
1,74	1,825	2,03	2,3800
1,81	1,905	2,10	2,5700
1,88	1,975	2,17	2,7800
1,95	2,045	2,24	2,9900
2,02	2,115	2,32	3,2000
2,10	2,200	2,40	3,4600
2,26	2,360	2,62	4,0100
2,44	2,540	2,80	4,6800
2,63	–	2,99	5,4300
2,83	–	3,19	6,2900
3,05	–	3,42	7,3100
3,28	–	3,65	8,4500

Додаток Б

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ

Таблиця Б.1 – Основна крива намагнічування сталі марки 2212

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/мм									
0,5	0,123	0,125	0,128	0,131	0,134	0,137	0,140	0,143	0,146	0,149
0,6	0,153	0,156	0,159	0,163	0,166	0,169	0,173	0,176	0,180	0,184
0,7	0,188	0,191	0,195	0,199	0,203	0,207	0,211	0,215	0,219	0,223
0,8	0,228	0,232	0,237	0,241	0,246	0,250	0,255	0,260	0,265	0,270
0,9	0,275	0,281	0,286	0,292	0,297	0,303	0,309	0,315	0,321	0,328
1,0	0,334	0,341	0,348	0,355	0,362	0,369	0,377	0,385	0,393	0,401
1,1	0,410	0,419	0,428	0,437	0,447	0,457	0,467	0,478	0,490	0,501
1,2	0,513	0,526	0,539	0,553	0,567	0,582	0,598	0,614	0,631	0,649
1,3	0,669	0,689	0,710	0,732	0,756	0,781	0,807	0,835	0,864	0,895
1,4	0,928	0,963	1,000	1,040	1,082	1,127	1,175	1,227	1,283	1,344
1,5	1,409	1,480	1,558	1,645	1,739	1,839	1,948	2,068	2,199	2,343
1,6	2,500	2,663	2,852	3,084	3,352	3,668	4,045	4,497	5,000	5,496
1,7	6,004	6,527	7,065	7,619	8,189	8,776	9,381	10,00	10,63	11,28
1,8	11,94	12,61	13,30	14,00	14,73	15,46	16,21	16,98	17,77	18,58
1,9	19,42	20,28	21,18	22,11	23,07	24,06	25,11	26,23	27,40	28,65
2,0	30,00	31,96	34,21	37,12	41,43	46,98	53,12	59,64	66,50	73,62
2,1	80,95	88,44	96,05	103,7	111,5	119,3	127,2	135,1	143,0	150,9
2,2	158,8	166,8	174,7	182,7	190,6	198,6	206,5	214,5	222,5	230,4
2,3	238,4	246,4	254,3	262,3	270,3	278,2	286,2	294,2	302,1	310,1
2,4	318,0									

На рис. Б.1–Б.3 надані криві намагнічування сталі марки 2212 для зубців осердя якоря при різних діапазонах магнітній індукції в них. Її значення відносяться безпосередньо сталевим листам зубців і розраховані для низки значень зубцевих коефіцієнтів k_{ta} , які визначені при коефіцієнті заповнення осердя сталлю $K_{Fea} = 0,95$. Тому криві можуть застосовуватися тільки у такому разі.

Значення зубцевого коефіцієнта k_{ta} , яке дорівнює 0,0526, відповідає умовному випадку, коли зубець осердя якоря займає увесь його зубцевий крок, тобто паз відсутній. Збільшення значень k_{ta} відбувається при збільшенні ширини паза.

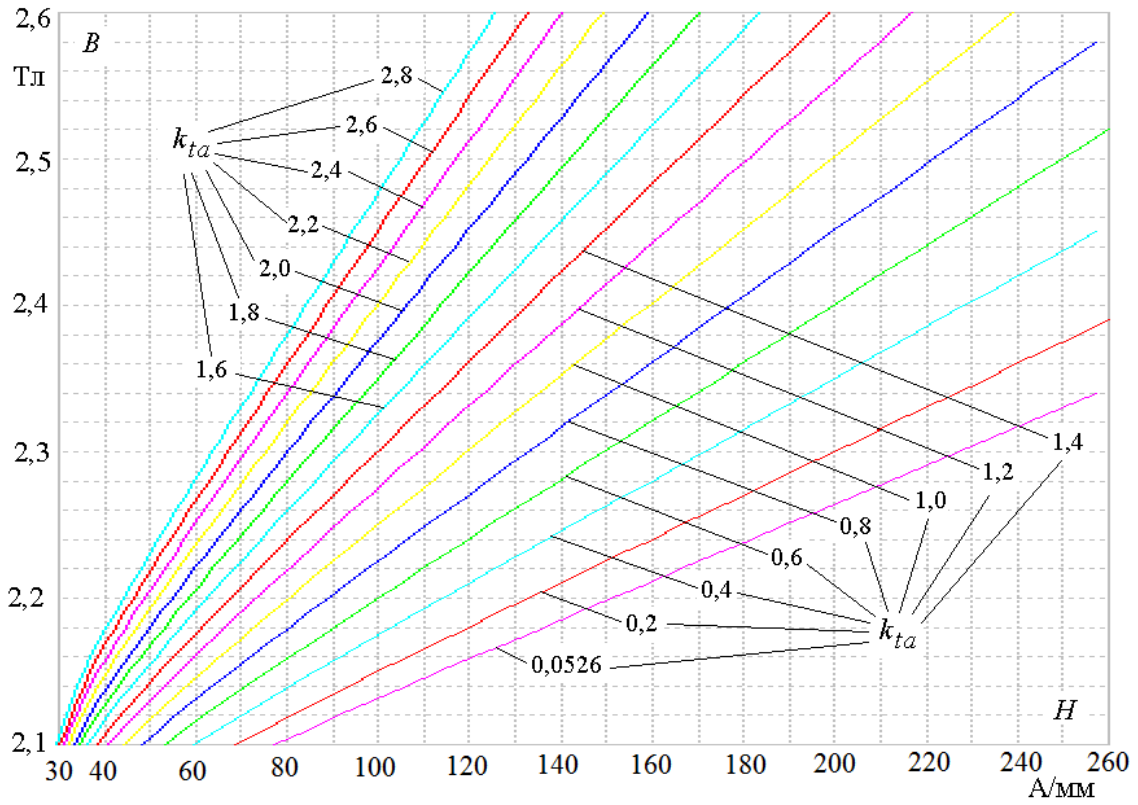


Рисунок Б.1 – Криві намагнічування сталі марки 2212 при магнітній індукції в сталевих листах зубців осердя якоря в діапазоні від 2,1 Тл до 2,6 Тл

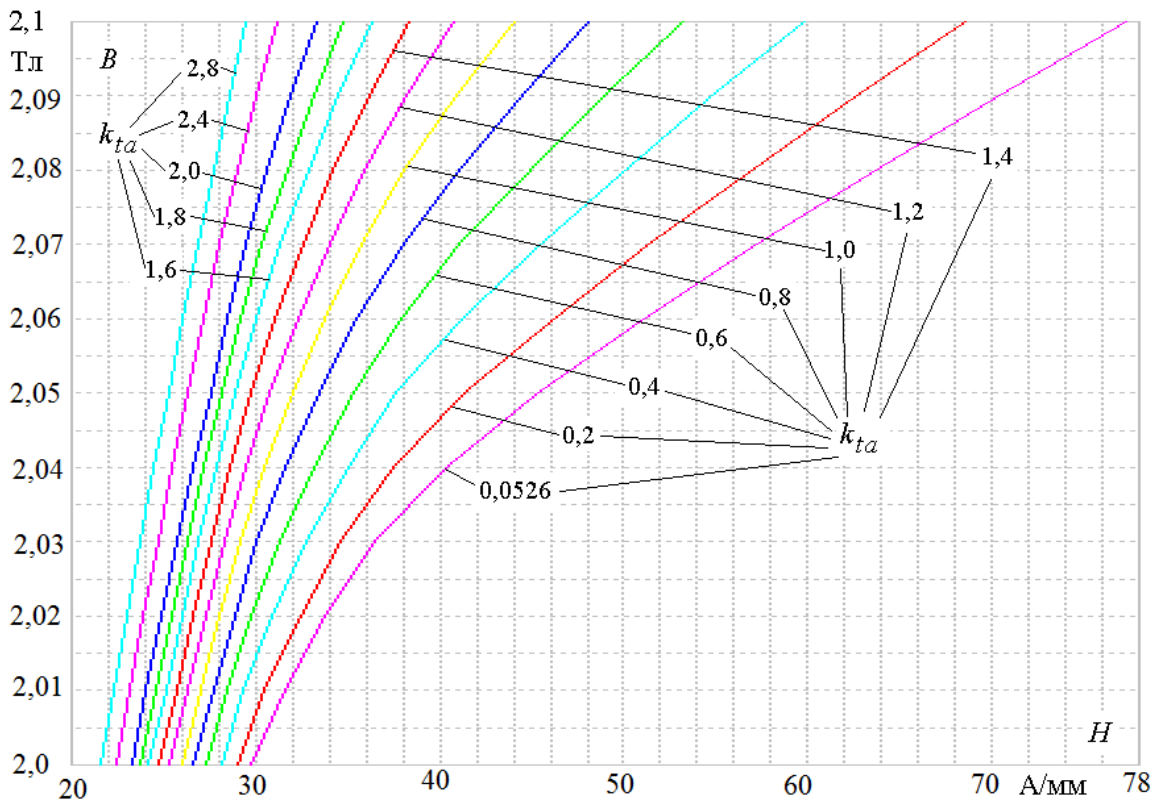


Рисунок Б.2 – Криві намагнічування сталі марки 2212 при магнітній індукції в сталевих листах зубців осердя якоря в діапазоні від 2,0 Тл до 2,1 Тл

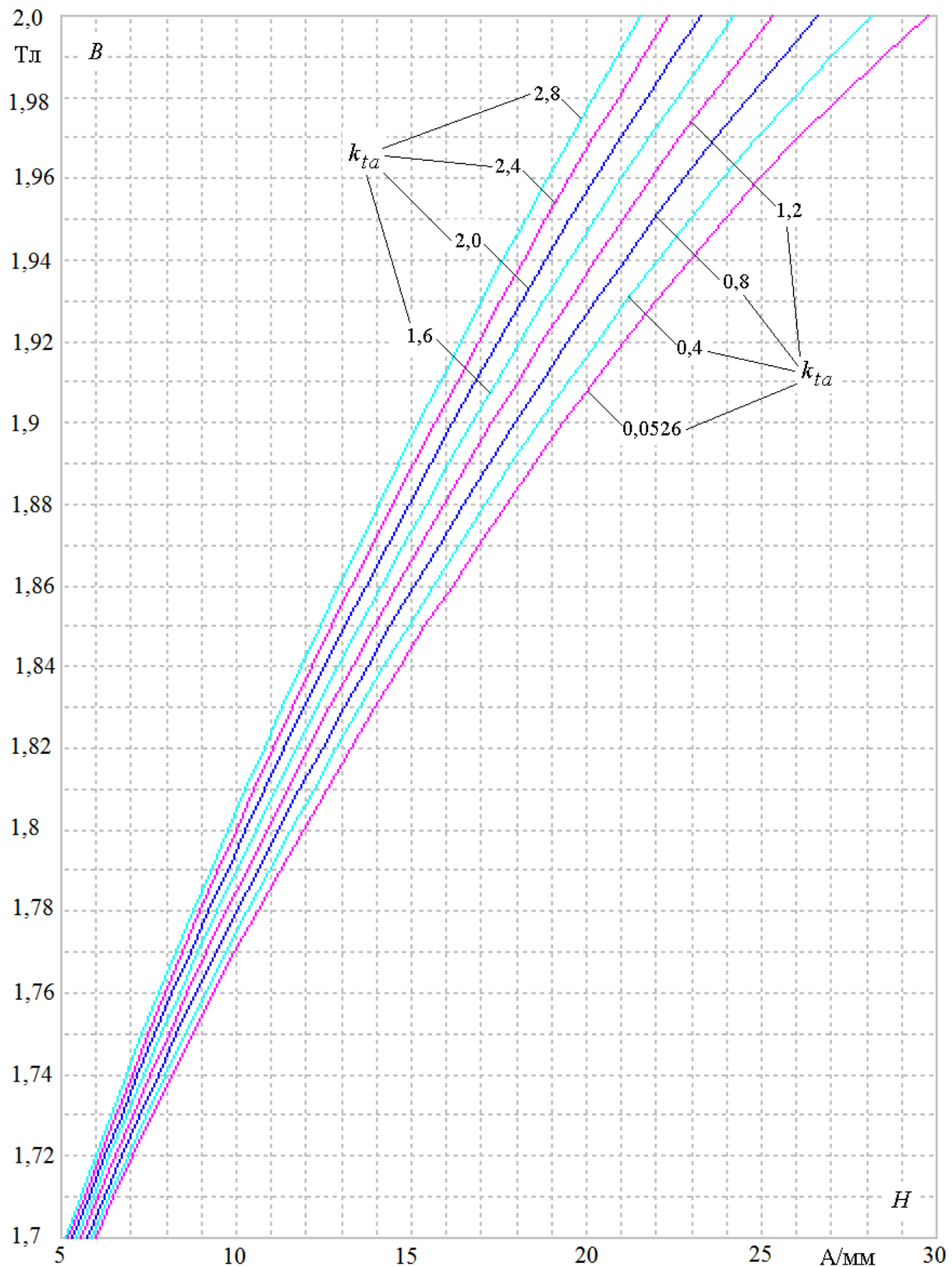


Рисунок Б.3 – Криві намагнічування сталі марки 2212 при магнітній індукції в сталевих листах осердя зубців осердя якоря в діапазоні від 1,7 Тл до 2,0 Тл

Рисунок Б.3 показує, що для зубців осердя якоря нижній рівень магнітної індукції, з якого бажано починати використовувати наведені графіки, починається максимум з її значення 1,7 Тл, але не з 1,8 Тл, що звичайно рекомендується в методиках проєктування електричних машин.

Таблиця Б.2 – Основна крива намагнічування сталі марки 3411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/мм									
1,0	0,17	0,17	0,18	0,185	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21
1,1	0,22	0,22	0,23	0,235	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27
1,2	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
1,3	0,37	0,38	0,40	0,41	0,42	0,43	0,45	0,46	0,47	0,48
1,4	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,68
1,5	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97
1,6	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
1,7	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,80	3,10	3,40	3,70
1,8	4,00	4,30	4,60	5,00	5,40	5,90	6,50	7,10	7,80	8,50
1,9	9,20	10,0	11,2	13,0	15,5	19,0	22,5	26,0	30,0	35,0
2,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	–	–	–	–	

Таблиця Б.3 – Основна крива намагнічування сталі марки ст3

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/мм									
0,5	0,400	0,404	0,417	0,426	0,434	0,443	0,452	0,461	0,470	0,479
0,6	0,488	0,497	0,506	0,516	0,525	0,535	0,544	0,554	0,564	0,574
0,7	0,584	0,593	0,603	0,613	0,623	0,632	0,642	0,652	0,662	0,672
0,8	0,682	0,693	0,703	0,724	0,734	0,745	0,755	0,766	0,776	0,787
0,9	0,798	0,810	0,823	0,835	0,848	0,850	0,873	0,885	0,898	0,911
1,0	0,924	0,938	0,953	0,969	0,986	1,004	1,022	1,039	1,056	1,073
1,1	1,090	1,108	1,127	1,147	1,167	1,187	1,207	1,227	1,248	1,269
1,2	1,290	1,315	1,340	1,370	1,400	1,430	1,460	1,490	1,520	1,555
1,3	1,590	1,630	1,670	1,720	1,760	1,810	1,860	1,920	1,970	2,030
1,4	2,090	2,160	2,230	2,300	2,370	2,440	2,530	2,620	2,710	2,800
1,5	2,890	2,990	3,100	3,210	3,320	3,430	3,560	3,700	3,830	3,960
1,6	4,100	4,250	4,400	4,550	4,700	4,870	5,000	5,150	5,300	5,500

Додаток В

ТЕХНІЧНІ ДАНІ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ 4П

Таблиця В.1 – Приклади технічних даних двигунів постійного струму)

Тип двигуна	4ПН200М	4ПН225М	4ПН250М	4ПН280М
P_N , кВт	30	48	80	132
U_N , В	220	220	220	220
I_{aN} , А	152	244	404	658
n_N , об/хв	1600	1500	1500	1500
η_N , %	87,0	88,5	89,5	91,5
d_{se} , мм	202	228	261	294
l_a , мм	230	250	260	310
$2p$	4	4	4	4
a_e	0,637	0,609	0,610	0,624
Тип обмотки	Хвильова	Хвильова	Хвильова	Петльова
Q_a	37	33	27	38
h_{na} , мм	29,3	28,5	29,5	37,0
b_{na} , мм	Паз овальний	7,8	10,9	8,1
d_c , мм	160	180	200	200
τ_c , мм	4,53	5,71	7,76	5,51
δ , мм	1,9	1,75	2,5	2,2
B_δ , Тл	0,755	0,762	0,782	0,821
A , А/мм	26,7	37,7	40,0	48,6

ГЕОМЕТРИЧНІ ФОРМИ ДВИГУНА

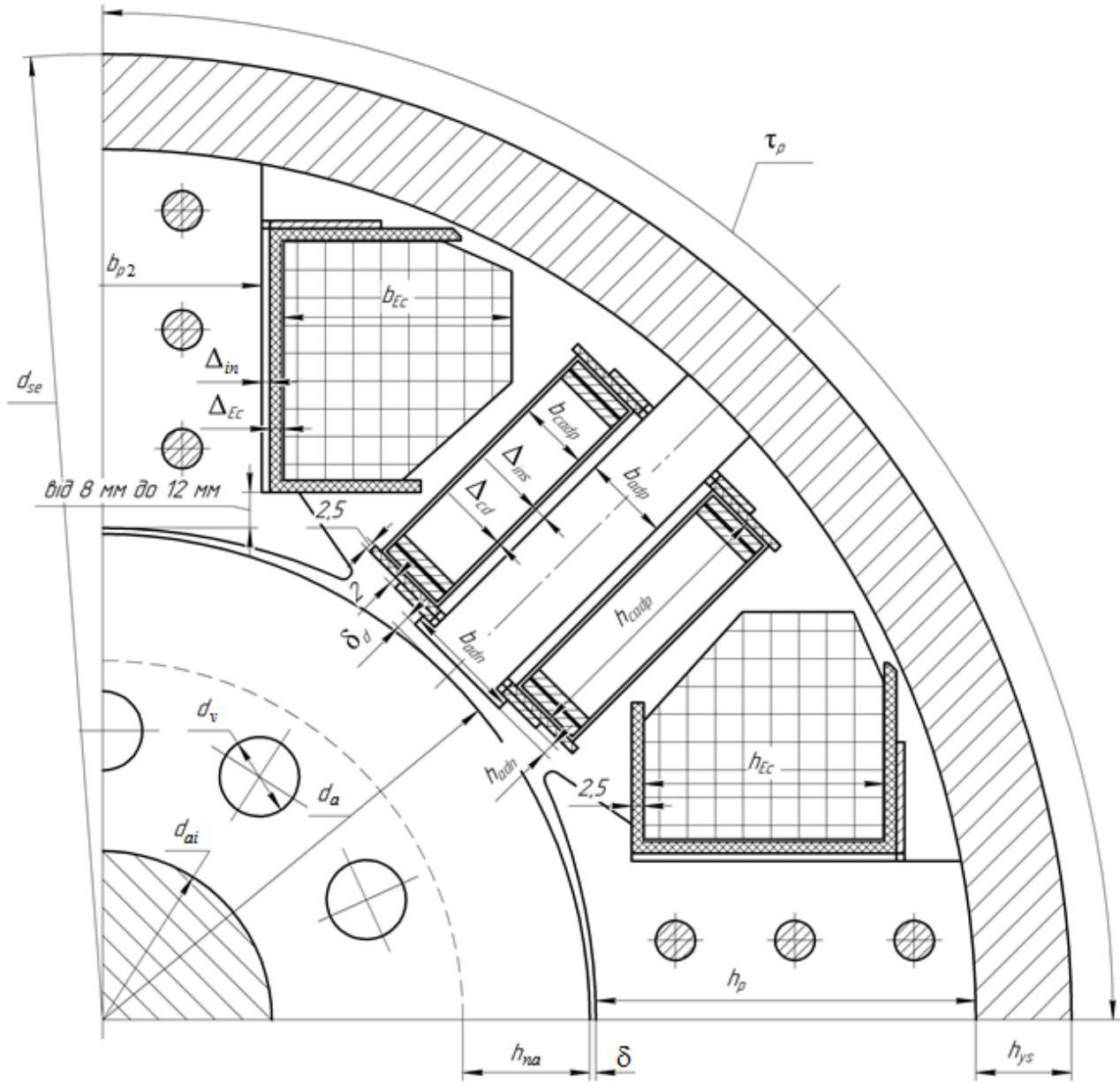
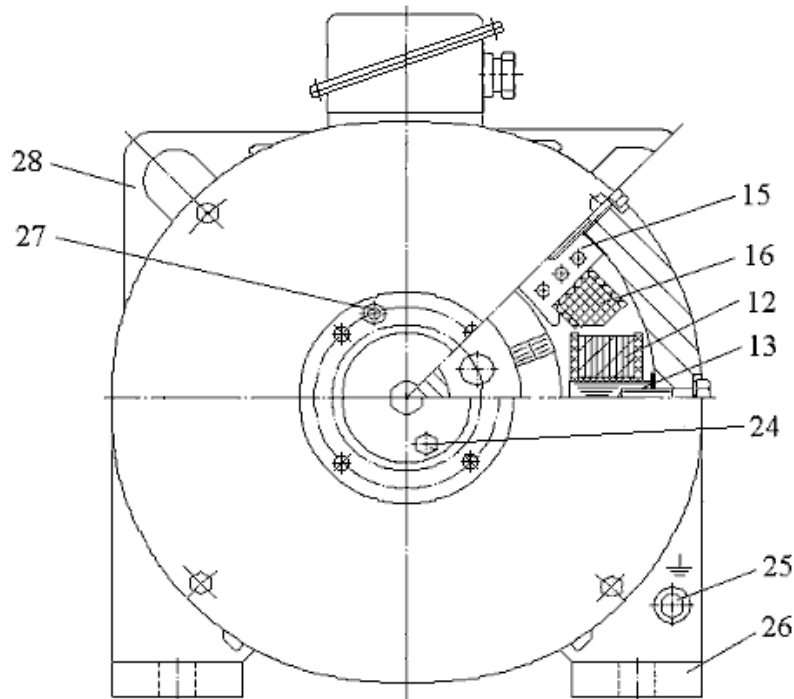
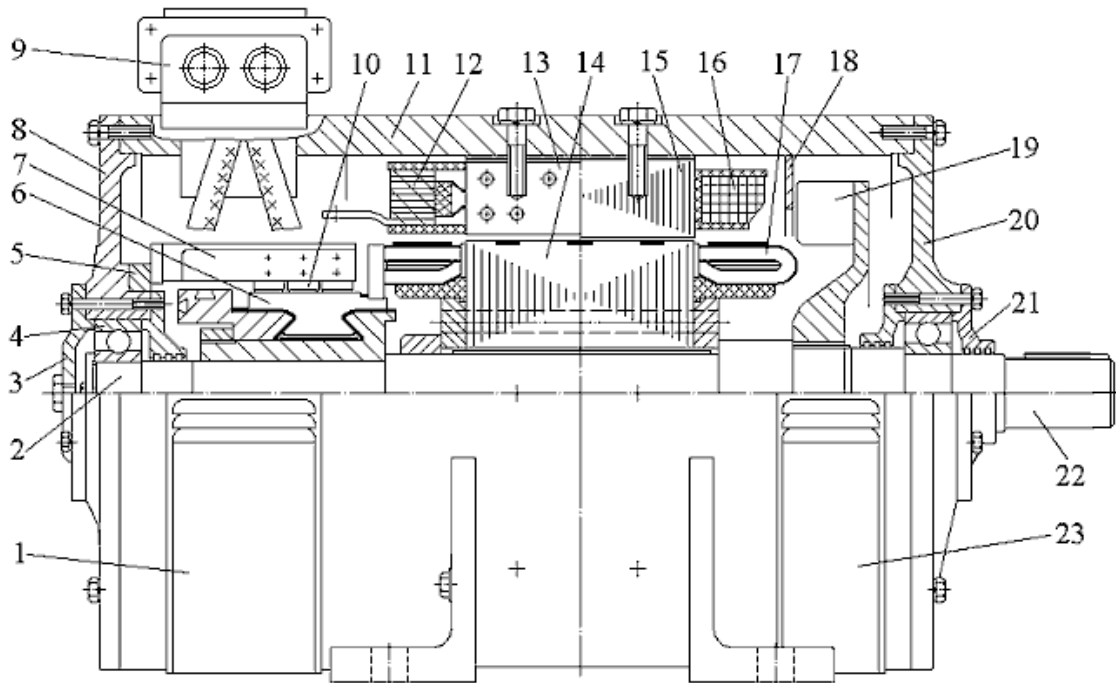


Рисунок Г.1 – Магнітна система двигуна постійного струму



- 1 – кришка люкова колекторна; 2 – вал; 3 – кришка вальницева;
 4 – вальниця кулькова; 5 – траверса щіткова; 6 – колектор; 7 – болт (бракет) щітковий; 8 – щит вальницевий передній; 9 – коробка виведень;
 10 – щікотримач зі щіткою; 11 – станина; 12 – обмотка додаткового полюса; 13 – осердя додаткового полюса; 14 – осердя якоря; 15 – осердя головного полюса; 16 – обмотка головного полюса; 17 – обмотка якоря;
 18 – діафрагма; 19 – вентилятор; 20 – щит вальницевий задній;
 21 – кільце лабіринтне; 22 – вільний кінець вала; 23 – кришка люка вентилятора; 24 – болт для виходу відпрацьованого мастила;
 25 – болт заземлення; 26 – лапа; 27 – маслянка; 28 – вушко транспортне

Рисунок Г.2 – Конструкція двигуна постійного струму типу 4ПН225М

Додаток Д

ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВОГО
ТА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ СЕРІЇ 4П

(за даними АО «Електромашина», сайт www.electromashina.com.ua)

Таблиця Д.1 – Номінальні параметри електродвигунів постійного струму типу 4ПНМ200-4ПНМ280

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А	Частоти обертання n_N/n_{max} , об/хв	ККД, %
4ПНМ200СУХЛ4	36,0	220	181,0	2200/3500	88,5
	36,0	440	89,7	2200/3500	89,5
	40,0	220	200,0	3000/3000	87,0
	60,0	440	149,0	3150/3500	90,5
4ПНМ200МУХЛ4	30,0	220	150,0	1600/3600	88,5
	30,0	440	74,5	1600/3500	89,5
	53,0	440	131,0	2360/3500	90,5
	75,0	440	184,0	3150/3500	91,5
4ПНМ225СУХЛ4	37,0	220	189,0	1500/3000	86,5
	37,0	440	94,0	1500/1850	86,5
4ПНМ225МУХЛ4	32,0	220	164,0	1060/2500	85,0
	32,0	440	82,0	1060/2250	84,5
	48,0	220	244,0	1500/3000	87,3
4ПНМ250СУХЛ4	38,0	220	195,0	1060/2500	85,0
	38,0	440	99,0	1060/2500	85,0
	50,0	440	130,0	1500/1800	87,0
	60,0	220	306,0	1500/2800	87,1
	60,0	440	155,0	1700/2800	87,0
4ПНМ250МУХЛ4	32,0	220	165,0	750/2000	84,0
	48,0	220	248,0	1000/2500	85,5
	48,0	440	125,0	1000/1500	86,0
	71,0	440	180,0	1500/2800	88,5
	80,0	220	402,0	1500/2800	89,5
4ПНМ280СУХЛ4	34,0	220	175,0	600/1500	84,5
	45,0	220	230,0	750/2000	87,0
	68,0	220	342,0	1000/2250	88,5
	80,0	440	202,0	1180/2400	88,5
	106,0	220	528,0	1500/2600	89,5
	100,0	440	247,0	1500/2250	89,0
4ПНМ280МУХЛ4	30,0	440	77,0	500/1250	83,5
	37,0	220	190,0	600/1500	85,5
	55,0	220	280,0	750/2000	87,3
	79,0	440	197,0	1000/2250	88,4
	124,0	220	612,0	1500/2600	90,4
	123,0	440	303,0	1500/1900	92,0

Таблиця Д.2 – Номінальні параметри електродвигунів постійного струму типу 4ПФМ200-4ПФМ280 та 4ППМ200-4ППМ280

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А	Частоти обертання n_N/n_{max} , об/хв	ККД, %
4ПФМ200СУХЛ4 4ППМ200СУХЛ4	30,0	340	96,0	2120/3500	90,0
	30,0	440	74,0	2200/3500	90,0
	40,0	340	129,0	3000/3500	90,5
	40,0	440	99,0	3000/3500	90,5
4ПФМ200МУХЛ4 4ППМ200МУХЛ4	30,0	220	150,0	1500/3500	88,5
	30,0	340	96,3	1500/3500	89,0
	30,0	440	75,0	1500/3500	88,5
	42,0	340	133,0	2360/3500	90,5
	42,0	440	103,0	2360/3500	90,5
4ПФМ225СУХЛ4 4ППМ225СУХЛ4	45,0	220	232,0	1500/3000	86,8
	40,0	440	103,0	1500/2700	86,8
	45,0	440	115,0	1500/2000	87,2
4ПФМ225МУХЛ4 4ППМ225МУХЛ4	37,0	220	191,0	1060/3000	85,5
	37,0	440	95,0	1060/2250	85,6
	55,0	220	280,0	1500/3000	87,6
4ПФМ250СУХЛ4 4ППМ250СУХЛ4	31,5	220	169,0	750/2000	82,0
	37,0	440	97,0	850/2100	83,4
	45,0	220	232,0	1060/2800	85,5
	45,0	440	116,0	1060/2250	86,7
	56,0	440	144,0	1500/1800	87,5
	67,0	220	340,0	1500/2800	87,0
	71,0	440	178,0	1700/2800	88,0
4ПФМ250МУХЛ4 4ППМ250МУХЛ4	42,0	220	223,0	750/2000	83,2
	37,0	440	99,0	750/2000	82,9
	55,0	220	284,0	1000/2500	86,0
	55,0	440	142,0	1000/1500	86,4
	71,0	440	180,0	1500/2800	88,5
	80,0	220	403,0	1500/2800	89,0
	80,0	440	202,0	1500/2800	88,8
4ПФМ280СУХЛ4 4ППМ280СУХЛ4	45,0	220	234,0	600/1800	84,5
	55,0	440	142,0	750/1100	86,4
	75,0	440	190,0	1180/2600	88,5
	84,0	220	425,0	1000/2250	88,5
	90,0	440	224,0	1180/2600	89,0
	120,0	440	297,0	1500/2100	89,5
	125,0	220	624,0	1500/2400	90,2

Продовження таблиці Д.2

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А	Частоти обертання n_N/n_{max} , об/хв	ККД, %
4ПФМ280МУХЛ4 4ППМ280МУХЛ4	45,0	440	118,0	500/1250	83,9
	55,0	220	284,0	600/1800	85,3
	55,0	440	142,0	600/1000	85,4
	68,0	220	352,0	750/1900	87,0
	68,0	440	175,0	750/1000	87,1
	100,0	440	251,0	1000/2400	89,2
	140,0	220	693,0	1500/2600	90,8
	145,0	440	358,0	1500/1900	91,0
	160,0	440	393,0	1900/2400	91,2
4ПФМ280ЛУХЛ4 4ППМ280ЛУХЛ4	55,0	220	291,0	500/1500	83,8
	55,0	440	145,0	500/750	84,2
	100,0	440	258,0	750/2000	85,8
	102,0	220	520,0	800/2000	87,6
	118,0	440	297,0	1000/2000	89,3
	122,0	220	611,0	1000/2000	89,3
	132,0	440	325,0	1120/2000	90,5
	160,0	440	392,0	1500/2000	90,5
	180,0	440	442,0	1500/2000	91,0
	200,0	440	490,0	1700/2000	91,7

Таблиця Д.3 – Номінальні параметри електродвигунів постійного струму типу 4ПФМ315М-4ПФМ355М, 4ПФМ400LK

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А	Частоти обертання n_N/n_{max} , об/хв	ККД, %
4ПФМ315МУХЛ4	71	440	186,0	530/1000	86,5
	90	440	236,0	630/1500	86,5
	110	440	281,0	750/1800	89,0
	145	440	362,0	1180/2000	91,0
4ПФМ355МУХЛ4	90	440	230,0	500/1000	87,3
	110	440	280,0	600/1200	87,9
	150	440	375,0	750/1000	90,0
	200	440	490,0	1000/2000	91,5
4ПФМ400LK	110	440	293,0	300/1500	85,3
	132	440	345,0	300/1500	85,0
	160	440	403	370/1250	89,6
	200	440	503	405/1250	89,6

СХЕМИ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

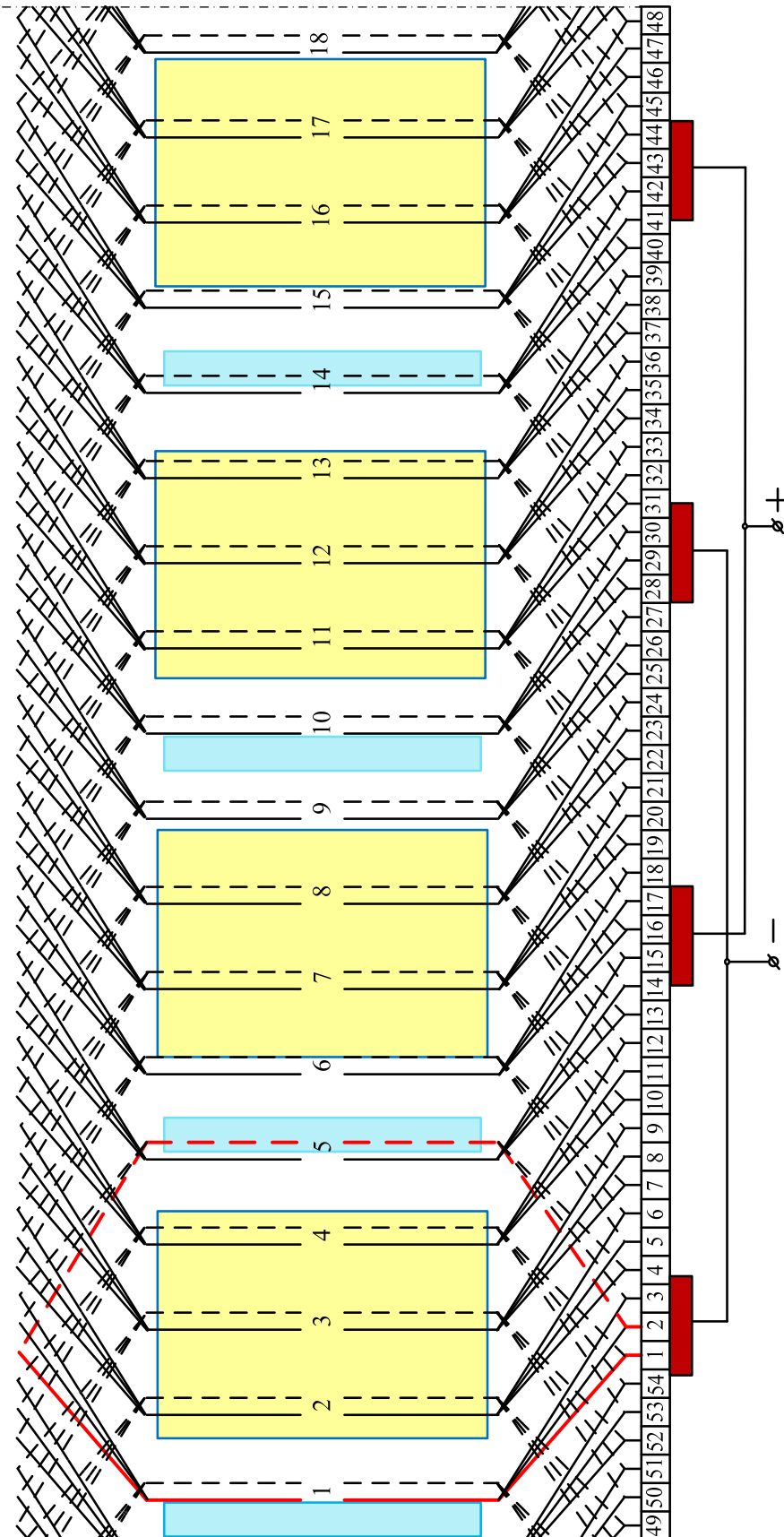


Рисунок Е.1 – Схема простої петльової обмотки якоря з параметрами

$2p=4$; $Q_a=18$; $w_s=1$; $u_{II}=3$; $N_s=54$; $z_a=108$; $K=54$

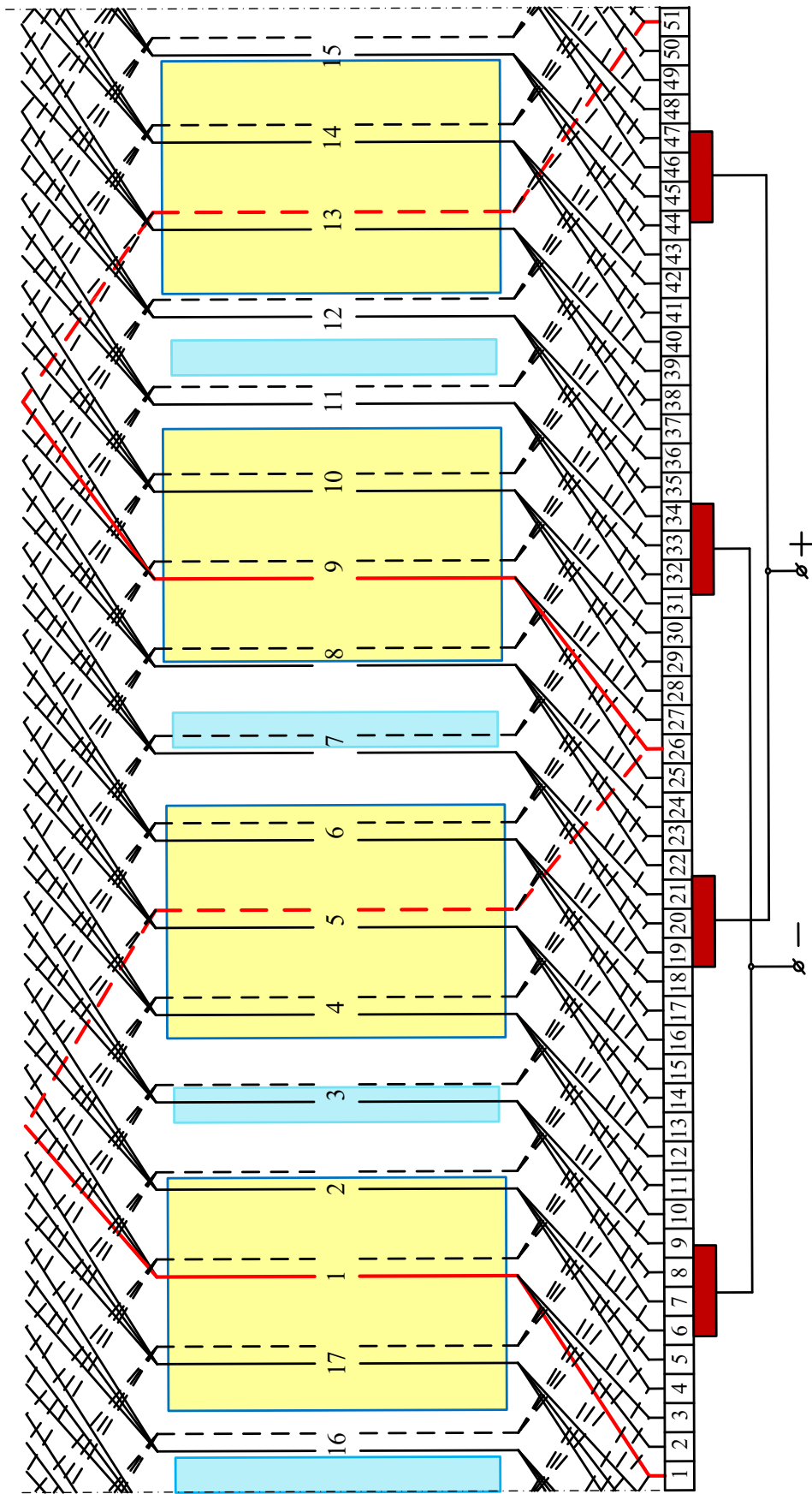


Рисунок Е.2 – Схема простой хвильовой обмотки якоря з параметрами

$2p=4$; $Q_a=17$; $w_s=1$; $u_n=3$; $N_s=51$; $z_a=102$; $K=51$

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДВИГУНИ, ЩО ПРОЄКТУЮТЬСЯ	5
2 ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТУВАННЯ	12
3 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ	13
4 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЯКОРЯ	19
5 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ПАЗА І ЗУБЦЯ	24
6 РОЗРАХУНОК КОЛЕКТОРА ТА ВИБІР ЩІТОК	33
7 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ОСЕРДЬ ГОЛОВНИХ ПОЛЮСІВ ТА СТАНИНИ	37
8 ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТОРУШІЙНОЇ СИЛИ (MPC) НЕРОБОЧОГО ХОДУ	40
9 ВИЗНАЧЕННЯ MPC ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ ДВИГУНА	46
10 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ	47
11 РОЗРАХУНОК КОМУТАЦІЇ ТА ДОДАТКОВИХ ПОЛЮСІВ	51
12 МАСИ СКЛАДОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ДВИГУНА В ЦІЛОМУ	55
13 ВТРАТИ ТА ККД ДВИГУНА	57
14 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА	60
15 ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК	65
16 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77
Додаток А ОБМОТУВАЛЬНІ ПРОВОДИ	78
Додаток Б МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ	87
Додаток В ТЕХНІЧНІ ДАНІ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ 4П	91
Додаток Г ГЕОМЕТРИЧНІ ФОРМИ ДВИГУНА	92
Додаток Д ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВОГО ТА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ СЕРІЇ 4П	94
Додаток Е СХЕМИ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	97

Навчальне видання

МІЛИХ Володимир Іванович,
ШАЙДА Віктор Петрович, ЮР'ЄВА Олена Юріївна

РОЗРАХУНОК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Навчально-методичний посібник
з дисципліни

**«Проектування та технологія виготовлення
машин постійного струму»**
для студентів спеціальності
«Електрична інженерія»

За редакцією В. І. Мілих

Відповідальний за випуск доц. А. В. Єгоров

Роботу рекомендував до видання доц. О. О. Чепелюк

План 2024, поз. 130.

Підписано до друку. 02.05.25. Формат 60x84 1/16. Папір офсет.
Друк. цифровий. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 4,8. Наклад 50 прим.

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А. М.
Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.05.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6
тел.+38(057)714-06-74, +38(050) 976-32-87
copy@vlavke.com.ua, <http://vlavke.com.ua>

Довідка про авторів
навчально-методичного посібника

РОЗРАХУНОК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мілих Володимир Іванович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри «Електричні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»



Юр'єва Олена Юріївна, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електричні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Шайда Віктор Петрович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електричні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Сайт кафедри електричних машин:
<http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>

E-mail: mvikemkpi@gmail.com
Volodymyr.Milykh@khipi.edu.ua