

В.П. Шевченко  
О.В. Бабушанов

# ПРОЕКТУВАННЯ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Навчальний посібник

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
для студентів вищих навчальних закладів*

Одеса  
Наука і техніка  
2016

УДК 621.313.001.2  
ББК 31.261.5 я73  
ШЗ7

Рецензенти: *В. І. Живиця*, д-р техн. наук, проф.;  
*А. А. Ставинський*, д-р техн. наук, проф.;  
*О. А. Онищенко*, д-р техн. наук, доц.;  
*І. М. Радимов*, канд. техн. наук, доц.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів  
(Лист №1/11-16167 від 17.10.12)*

### **Шевченко В. П.**

ШЗ7 Проектування машин постійного струму: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / В. П. Шевченко, О. В. Бабушанов. – О.: Наука і техніка, 2016.– 309 с.

ISBN 978-966-1552-65-3

Навчальний посібник містить матеріал з проектування регульованих електричних машин постійного струму, у т. ч. й тягових, аналізу їх експлуатаційних показників і регульовальних властивостей. Детально розглянуті питання вибору конфігурації повітряного зазору та розрахунку еквівалентного зазору, розрахунку додаткових полюсів, максимальної швидкості та характеристик при регулюванні частоти обертання вверх та вниз від номінальної.

Наведено приклад розрахунку двигуна постійного струму.

Навчальний посібник призначений для студентів електромеханічних спеціальностей.

**УДК 621.313.001.2  
ББК 31.261.5 я73**

ISBN 978-966-1552-65-3

© Наука і техніка, 2016



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>1. СТРУКТУРА СЕРІЙ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....</b>	<b>6</b>
1.1. Серія 2П .....	6
1.2. Серія 4П .....	10
1.3. Порівняльні показники серій двигунів постійного струму .....	18
1.4. Серія 5П .....	19
1.5. Прокатні двигуни постійного струму .....	19
1.6. Тягові електричні машини .....	20
1.7. Регульовальна здатність двигунів постійного струму .....	26
<b>2. СТАНДАРТИ В ЕЛЕКТРОМАШИНОБУДУВАННІ .....</b>	<b>27</b>
<b>3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН .....</b>	<b>29</b>
3.1. Електроізоляційні матеріали .....	29
3.2. Магнітні матеріали .....	31
3.3. Обмотувальні проводи .....	31
3.4. Конструкційні матеріали .....	33
<b>4. ОБМОТКИ ЯКОРЯ .....</b>	<b>34</b>
4.1. Петльові обмотки якоря.....	34
4.2. Хвильові обмотки якоря .....	43
4.3. Комбіновані обмотки .....	48
4.4. Аналіз властивостей обмотки якоря .....	49
<b>5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК .....</b>	<b>51</b>
5.1. Визначення головних розмірів .....	51
5.2. Вибір типу обмотки якоря .....	56
5.3. Розрахунок перерізу ефективного провідника обмотки якоря ..	57
5.4. Розрахунок числа пазів якоря .....	59
5.5. Розрахунок числа колекторних пластин .....	62
5.6. Розрахунок розмірів пазів якоря .....	64
5.7. Розрахунок компенсаційної обмотки .....	75
5.8. Розрахунок повітряного зазору під головним полюсом .....	81
5.9. Розрахунок розмірів магнітного кола .....	85
5.10. Розрахунок магнітного кола .....	88
5.11. Урахування дії поля якоря .....	96
5.12. Розрахунок обмоток збудження .....	98
5.13. Визначення розмірів щіток і колектора .....	102
5.14. Розрахунок реактивної електрорушійної сили .....	107
5.15. Розрахунок додаткових полюсів .....	109
5.16. Оцінка якості розрахунку додаткових полюсів .....	117
5.17. Розміщення обмоток головних і додаткових полюсів .....	122

5.18. Розрахунок втрат і ККД .....	129
5.19. Розрахунок максимальної частоти обертання .....	135
<b>6. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА .....</b>	<b>146</b>
6.1. Механічні характеристики .....	146
6.2. Аналіз магнітного поля при перевантаженні .....	151
6.3. Розрахунок постійних часу .....	155
6.4. Розрахунок характеристик на ПЕОМ .....	156
<b>7. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ .....</b>	<b>157</b>
7.1. Визначення діаметра якоря .....	157
7.2. Аналіз характеристик тягового двигуна .....	161
7.3. Застосування ПЕОМ при аналізі тягових електродвигунів .....	171
<b>8. СПРОЩЕНИЙ ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК .....</b>	<b>172</b>
<b>9. ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК .....</b>	<b>182</b>
<b>10. МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ .....</b>	<b>185</b>
10.1. Розрахунок колектора .....	185
10.2. Розрахунок кріплення обмотки .....	187
10.3. Розрахунок кріплення полюсів .....	190
<b>11. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ .....</b>	<b>192</b>
<b>12. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....</b>	<b>195</b>
<b>13. ПІДГОТОВКА ДО ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ .....</b>	<b>242</b>
13.1. Запитання до захисту проекту .....	242
13.2. Тести для самоконтролю .....	244
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>252</b>
А. Характеристики намагнічування сталей .....	252
Б. Розміри обмотувальних проводів круглого перерізу .....	260
В. Розміри обмотувальних проводів прямокутного перерізу.....	261
Г. Розміри голої шинної міді .....	270
Д. Робота на ПЕОМ при виконанні проекту .....	275
Е. Показники двигунів постійного струму із самовентиляцією .....	299
Ж. Оформлення результатів проектування .....	301
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>304</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>305</b>
<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК .....</b>	<b>306</b>

## ВСТУП

Посібник містить матеріал з проектування двигунів постійного струму з широким діапазоном регулювання частоти обертання та аналізу експлуатаційних показників з використанням ПЕОМ. Використання матеріалу передбачає знання студентами питань загального курсу «Електричні машини». Матеріал посібника призначений для курсового та дипломного проектування машин постійного струму.

Проектування електричної машини передбачає не тільки її детальний розрахунок, а також якісний аналіз експлуатаційних властивостей в залежності від призначення та умов експлуатації.

Розрізняють 3 види проектування:

- проектування серії;
- проектування відрізка серії;
- проектування одиничної машини.

Незалежно від виду проектування необхідне виконання трьох умов:

- зниження питомих витрат матеріалів;
- спрощення технології;
- підвищення експлуатаційної надійності та енергетичних показників запроектованої електричної машини.

Навчальне проектування машин постійного струму виконується відповідно до технічного завдання, яке містить такі основні величини:

- номінальна потужність;
- номінальна частота обертання;
- номінальна напруга живлення;
- режим роботи ( $S$ );
- найбільша напруга на обмотці якорі при регулюванні частоти обертання збільшенням напруги;
- кратність регулювання частоти обертання вверх від номінальної при регулюванні частоти обертання зменшенням магнітного потоку;
- кратність регулювання частоти вниз від номінальної;
- спосіб збудження;
- співвідношення магніторушійних сил обмоток збудження (для двигуна постійного струму (ДПС) змішаного збудження);
- конструктивне виконання за ступенем захисту від навколишнього середовища (IP), за способом охолодження (IC) та способом монтажу (IM);
- клас нагрівостійкості ізоляції.

# 1. СТРУКТУРА СЕРІЙ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

За останні три десятиліття у світовому електромашинобудуванні відбулася зміна чотирьох поколінь конструкцій двигунів постійного струму.

Таблиця 1.1

## Конструктивне виконання ДПС

По- колін- ня	Статор	Потуж- ність, в. о.	Діапазон регулю- вання
1	Масивний, круглий з явно вираженими полюсами	1	1:5
2	Те саме	3	1:10
3	Шихтований, круглий з неявно вираженими полюсами	5	1:100
4	Шихтований, багатогранний (прямокутний), форсоване охолодження	10	1:1000

### 1.1. Серія 2П

В основу серії 2П покладений поділ електричних машин за висотами осі обертання. Серія 2П має 11 висот осі обертання: 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280 і 315 мм. Діапазон частот обертання – від 750 до 4000 об/хв. Діапазон потужностей для двигунів – від 0,17 до 200 кВт, для генераторів – від 0,37 до 180 кВт.

На кожній висоті осі обертання передбачені машини двох довжин станини (*M* и *L*) з уніфікованими розмірами листів якоря.

У серії 2П прийнято чотири виконання за ступенем захисту й способом охолодження машин:

- захищене виконання IP22 із самовентиляцією IC01 – позначається 2ПН;
- захищене виконання IP22 з незалежною вентиляцією IC05, IC06 – позначається 2ПФ;
- закрите виконання IP44 з природнім охолодженням IC0041 – позначається 2ПБ;
- закрите виконання IP44 із самовентиляцією IC0141 – позначається 2ПО.

Двигуни серії 2П виконуються з незалежним збудженням при напрузі збудження 110 або 220 В незалежно від напруги в колі якоря (110, 220, 340 або 440 В).

Генератори серії 2П виготовляються тільки в захищеному виконанні

IP22 із самовентиляцією 1С01. Збудження генераторів змішане, паралельне або незалежне.

Машини серії 2П захищеного виконання 2ПН при висоті осі обертання  $h_0=(90\dots 200)$  мм виготовляються з ізоляцією класу нагрівостійкості **B**, а двигуни захищеного виконання 2ПН з  $h_0=(225\dots 315)$  мм і закритого виконання 2ПБ і 2ПО – класу нагрівостійкості **F**.

Приклад умовного позначення двигуна серії 2П:

2ПН112МГУ4 – двигун захищеного виконання з самовентиляцією, висота осі обертання – 112 мм, першої довжини станини, укомплектований тахогенератором, кліматичне виконання У4.

На рис. 1.1 показаний устрій двигуна постійного струму типу 2ПН160МУ4.

Двигун має захищене виконання IP22, спосіб охолодження 1С01, клас ізоляції В. Станина сталева (сталь марки Ст3), осердя головних полюсів штампують з листів холоднокатаної електротехнічної сталі марок 3411 або 3413 завтовшки 1 мм (у деяких типорозмірах машин завтовшки 0,5 мм). Листи штампують разом з полюсними наконечниками. Полюсні котушки головних полюсів багатополосові з провідників круглого перерізу марки ПЕТВ.

У машинах з висотою осі обертання до 132 мм включно осердя додаткових полюсів роблять зі сталі марки Ст3 завтовшки 1 мм. Полюсні котушки додаткових полюсів виконують провідниками прямокутного перерізу марки ПСД, за винятком машин малої потужності, у яких для цієї мети застосовують провідники круглого перерізу марки ПЕТВ.

Осердя якоря набирають з листів холоднокатаної електротехнічної сталі марок 2013, 2211, 2312, або 2411 завтовшки 0,5 мм. Листи осердя якоря збирають на валу, спресовують і стискають двома шайбами, одна з яких упирається в уступ вала, а інша насаджена на вал по гарячій посадці.

Вал двигуна виготовлений зі сталі марки 45. На валу розташовані колектор, вентилятор, балансувальне кільце й підшипники.

У двигуні застосована аксіальна система вентиляції: повітря надходить у двигун через вікно в підшипниковому щиті з боку колектора, проходить через внутрішній об'єм машини й викидається назовні через вікно в підшипниковому щиті з боку привода. Для забезпечення необхідного ступеня захисту двигуна вентиляційні вікна прикриті сталевими захисними стрічками, які в нижній частині мають отвори, а в бічній частині – жалюзі. У середині двигуна є щиток (дифузор), що направляє потік повітря безпосередньо на лопатки вентилятора.

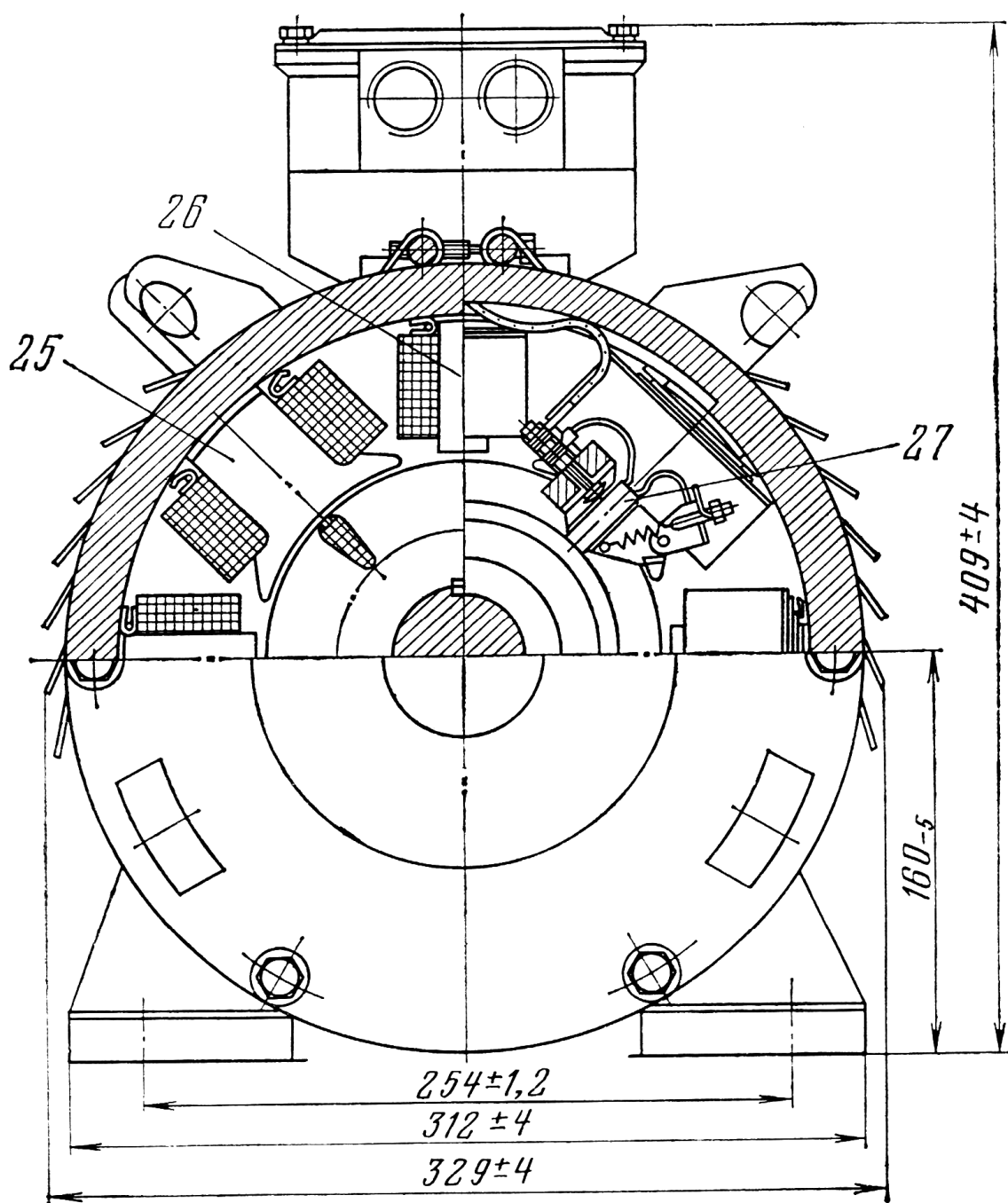


Рис. 1.1, а. Поперечний розріз двигуна типу 2ПН160МУ4, IP22  
(7,5 кВт, 220 В, 1500 об/хв):

- 1,16,23 – кришки підшипника; 2,18 – щити підшипникові;  
 3 – траверса; 4,14 – стрічка захисна; 5 – балансувальне кільце;  
 6 – колектор; 7 – пристрій вводу; 8 – станина;  
 9 – болт кріплення полюса; 10, 22 – шайба; 11 – осердя якоря;  
 12 – обмотка якоря; 13 – дифузор; 15 – вентилятор;  
 17 – шарикопідшипник; 19 – болт кріплення підшипникового щита;  
 20 – шайба; 21 – болт кріплення кришок підшипника; 24 – вал;  
 25 – головний полюс; 26 – додатковий полюс; 27 – щітки

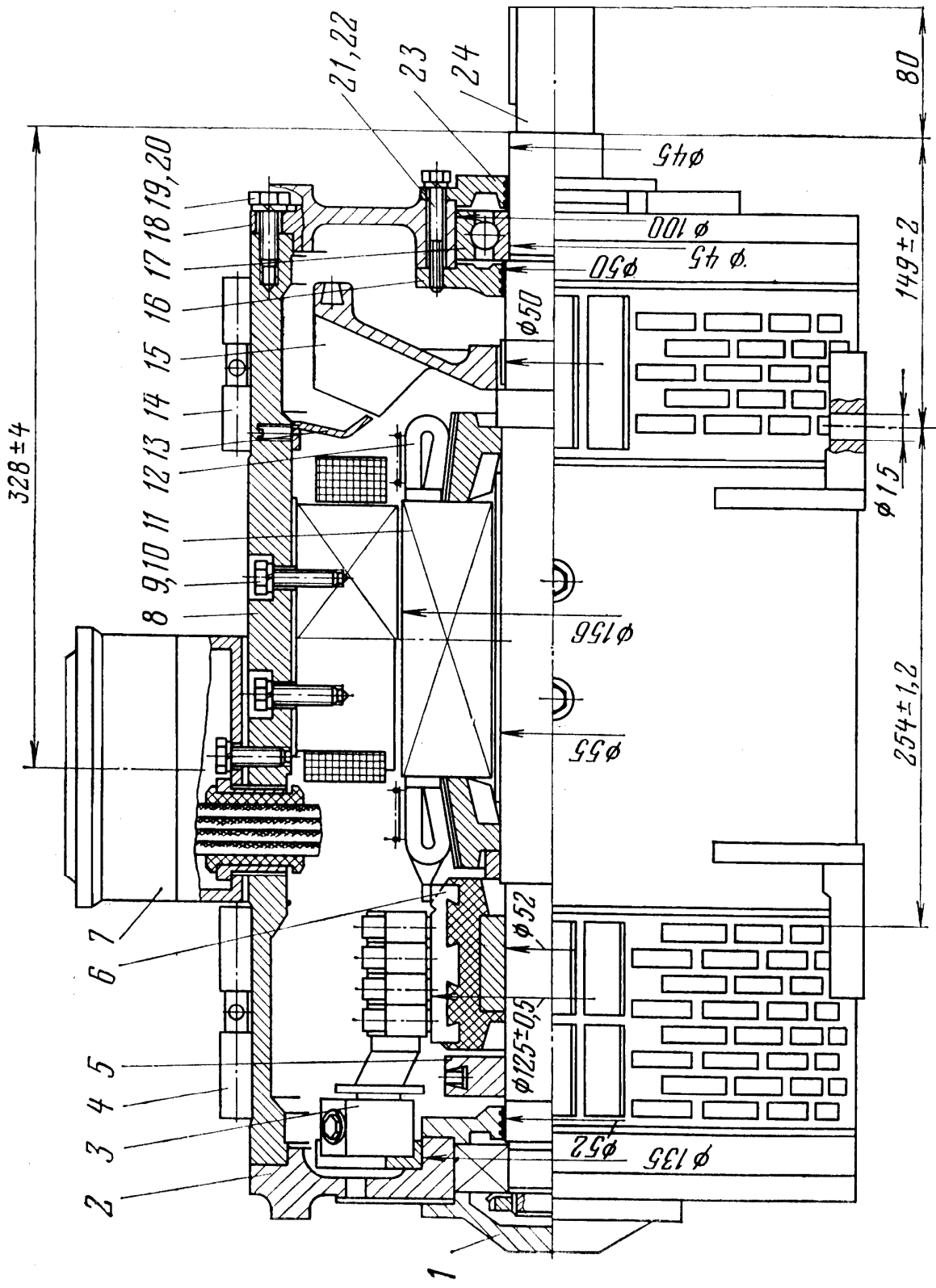


Рис. 1.1, б. Поздовжній розріз двигуна типу 2PH160MU4, IP22

До підшипникового щита з боку колектора прикріплена траверса із щіткотримачами, у які вставлені щітки. Кінці обмоток якоря, збудження й додаткових полюсів виведені на панель пристрою вводу. У машинах з висотою осі обертання  $h_0 \leq 200$  мм пристрій вводу розташований збоку або зверху станини, а  $h_0 = (225...315)$  мм – на торці щита з боку колектора.

## 1.2. Серія 4П

### *Загальні відомості*

Стрімкий розвиток автоматизованих систем визначив вимоги до ДПС тиристорних електроприводів з широким діапазоном регулювання частоти обертання:

- збільшення потужності при заданій висоті осі обертання у  $(3...4)$  рази;
- розширення діапазону регулювання частоти обертання у  $(2...2,5)$  рази;
- суттєве поліпшення динамічних і віброакустичних властивостей.

Виходячи з цих вимог в основу створення машин серії 4П покладені такі принципи диференціації двигунів постійного струму:

1 – за регульовальними властивостями:

- двигуни з нормальним регулюванням – до 1:5;
- двигуни з діапазоном регулювання частоти обертання до 1:1000;

2 – за типом конструкції:

- закриті, зі ступенем IP44 з повністю шихтованим магнітопроводом статора, укладеним у круглий чавунний або алюмінієвий корпус, зі способом охолодження IC0041 (без вентиляції) або IC0141 з поверхневим охолодженням за допомогою вентилятора, жорстко закріпленого на валу двигуна;
- захищені, зі ступенем захисту IP23 із шихтованим статором прямокутного перерізу без корпусу з охолодженням від автономного електровентилятора, встановленого зверху (збоку) – IC06 або по осі двигуна – IC05;

3 – за умовами експлуатації:

- нормальні, що відповідають кліматичним факторам при експлуатації при УХЛ4 і групі М1 за впливом механічних факторів зовнішнього середовища;
- з важкими умовами експлуатації (УХЛ3) і (М8) щодо до роботи в допоміжних механізмах металургійного виробництва, на екскаваторах, бурових установках і т. п.



## Позначення ДПС серії 4П

4П\_Н\_М\_200\_М\_Г\_ХЛ4

4П	позначення серії машини	
Х	Ф	захищене IP23 з незалежною вентиляцією від стороннього вентилятора IC06
	Н	захищене IP23 із самовентиляцією IC01
	П	закрите IP44 (захищене IP23), що продувається від стороннього вентилятора IC37 (IC17)
	Б	закрите IP44 з природним охолодженням IC0041
	О	закрите IP44, що обдувається IC0141
М	модифікація серії 4П	
ХХ	електрична модифікація: Г – генератор; 2В – збудник; відсутність знака – двигун	
ХХХ	висота осі обертання, мм	
Х	умовна довжина осердя якоря: S – перша довжина; M – друга довжина; L – третя довжина	
ХХ	підвищена точність. Відсутність знака – нормальна точність	
Г	наявність тахогенератора	
Т	температурний захист	
ХЛ4	кліматичне виконання й категорія розміщення	

***Закриті двигуни, що обдуваються,  
уніфікованої конструкції типу 4ПО й 4ПБ***

ДПС потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 потреби. Найбільше застосування вони дістали в комплектному тиристорному електроприводі у верстатобудуванні, на залізничному й морському транспорті.

З метою значного зниження (у 2...3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання й випробувань машин постійного струму технологічного устаткування, створеного для серії 4А.

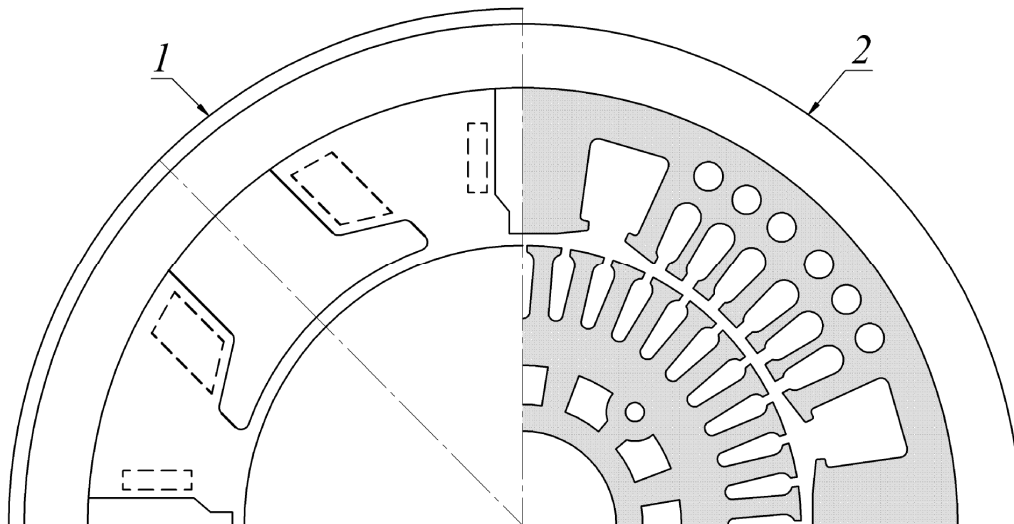


Рис. 1.2. Магнітна система двигунів: 1 – серія 2П; 2 – серія 4П

В уніфікованій конструкції типу 4ПО й 4ПБ магнітопровід статора (рис. 1.2) неявнополісний з обмотками в пазах, рівномірно розподілених уздовж його окружності. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах іншого розточення статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО (рис. 1.3) і 4ПБ однакового габариту з двигунами серії 4А можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники та їх кришки.

Переваги уніфікованої конструкції двигунів постійного струму порівняно з традиційною явнополісною конструкцією:

1 – розподіл статорних обмоток двигунів у порівняно великій кількості пазів, що дає позитивний ефект поліпшення тепловіддачі та дозволяє суттєво збільшити густину струму в них порівняно з прийнятими в зосереджених обмотках збудження й додаткових полюсів аж до значень, що відповідають густині струму статорних обмоток асинхронних двигунів;

2 – повна й досконала компенсація поля якоря по всій його окружності, що дозволяє зберегти незмінним поле збудження і його форму на неробочому ході й під навантаженням, знизити струм збудження в режимі навантаження порівняно з некомпенсованим ДПС;

3 – застосування повністю шихтованого магнітопроводу, що зменшує його магнітну асиметрію й практично усуває відставання в часі змін магнітного потоку додаткових полюсів від зміни струму в їх обмотках і, отже, підвищує комутаційну здатність двигунів у стаціонарних і динамічних режимах роботи;

4 – перехід до ступеня захисту IP44 підвищує надійність в експлуатації.

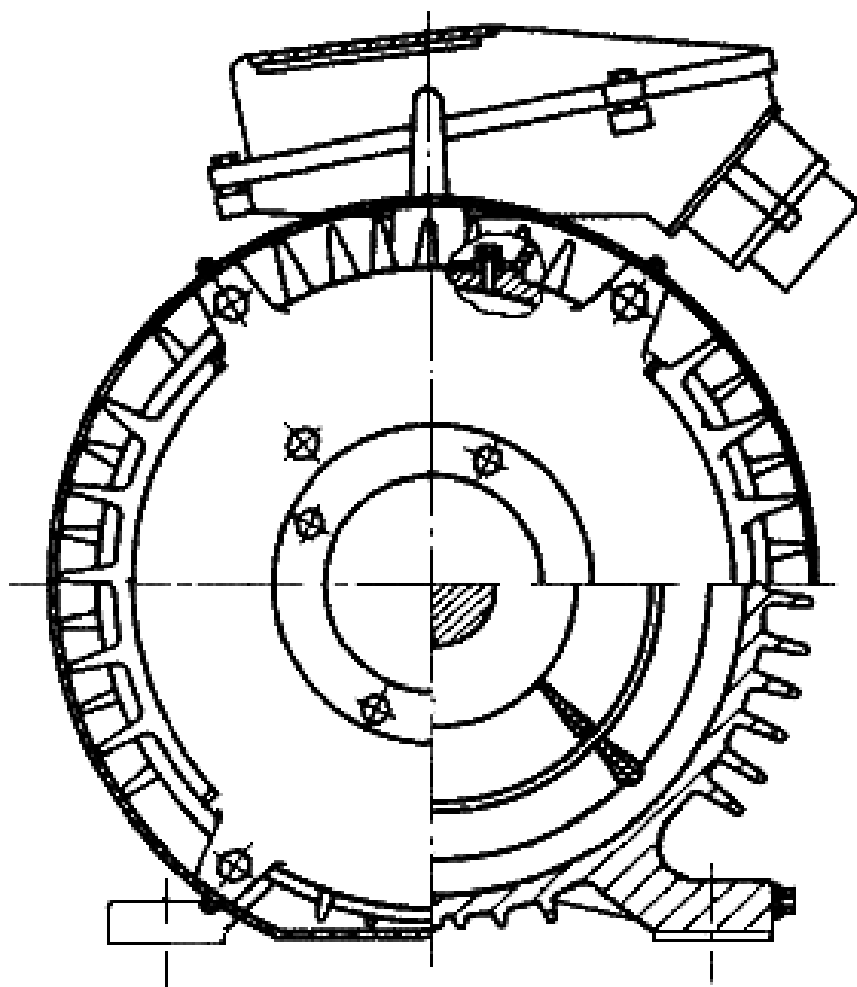
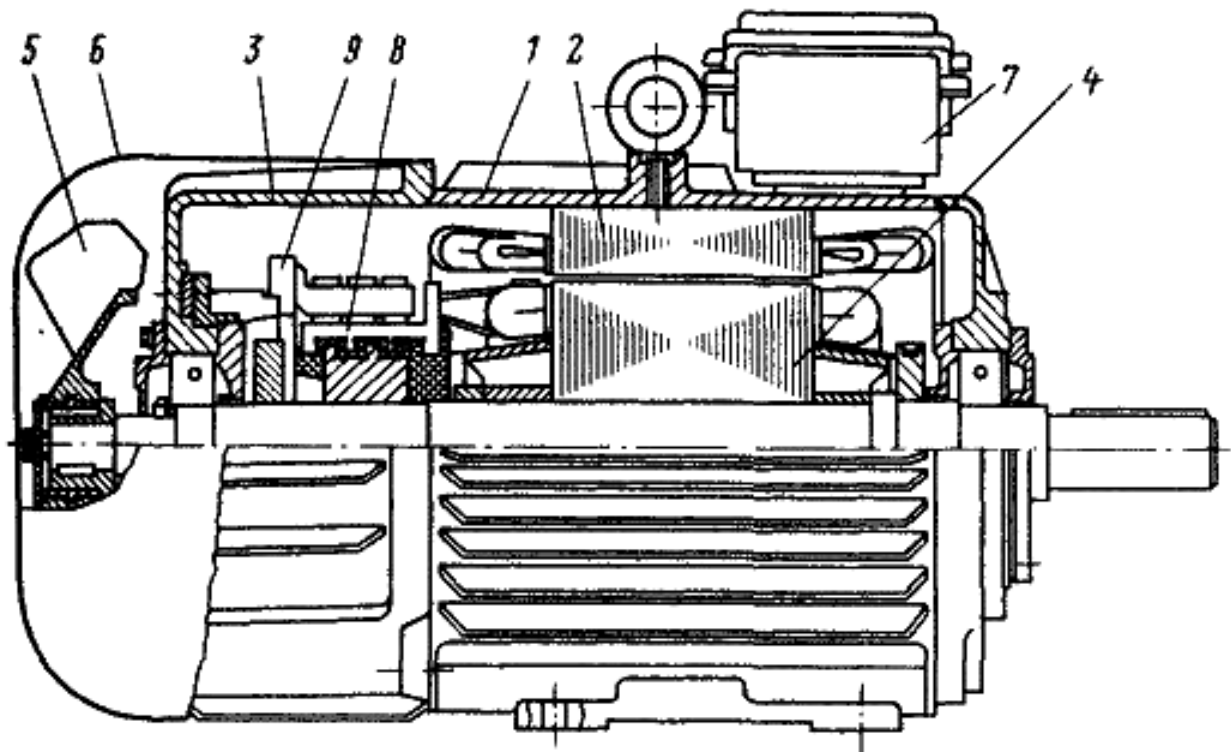


Рис. 1.3.  
 Двигун постійного струму уніфікованої конструкції типу 4ПО:  
 1 – корпус;  
 2 – магнітопровід статора;  
 3 – щит підшипниково-передній;  
 4 – осердя якоря;  
 5 – вентилятор;  
 6 – кожух;  
 7 – коробка виводів;  
 8 – колектор;  
 9 – траверса

Заміна двигунів серії 2П, як закритого, так і захищеного виконання

на двигуни уніфікованої конструкції серії 4П забезпечує таке:

- збільшення номінальної потужності в заданому габариті на одну ступінь;
- зниження матеріалоемності на (15...20) %;
- зменшення витрати обмотувальної міді на (25 ... 35) % ;
- зниження трудомісткості виготовлення у (2,5...3) рази.

При тиристорному живленні надійна робота двигунів серії 4П забезпечується без необхідності застосування згладжувального реактора у якірному колі, без зниження номінальної потужності, якщо коефіцієнт пульсації струму не перевищує 15 % (при коефіцієнті пульсації від 15 до 45 % номінальна потужність двигуна знижується не більше ніж на 10 %).

Двигуни допускають також експлуатацію в режимах  $S3...S8$ .

Двигуни допускають регулювання частоти обертання вниз від номінальної зниженням напруги на виводах якоря у діапазоні 1:1000 зі зниженням струму якоря до 50 % і вгору від номінальної до 4:1, ослабленням поля (зменшенням струму збудження) при номінальній напрузі на якорі. Стійкість роботи забезпечується системою регулювання привода.

Клас стійкості ізоляції обмоток за нагрівом – F.

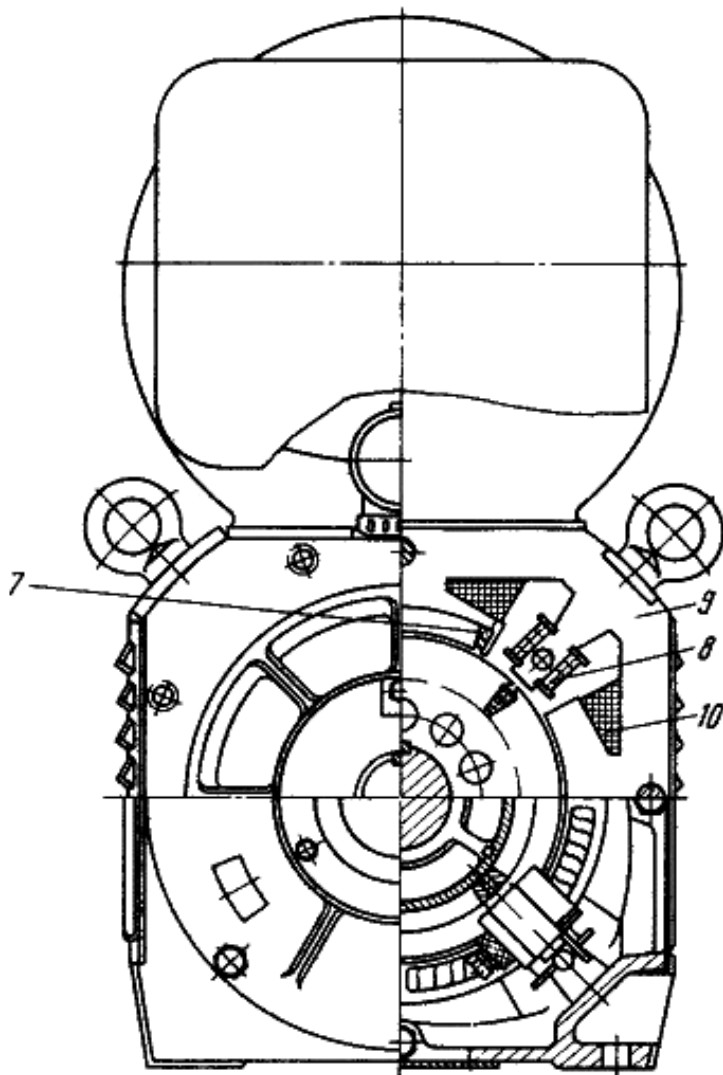
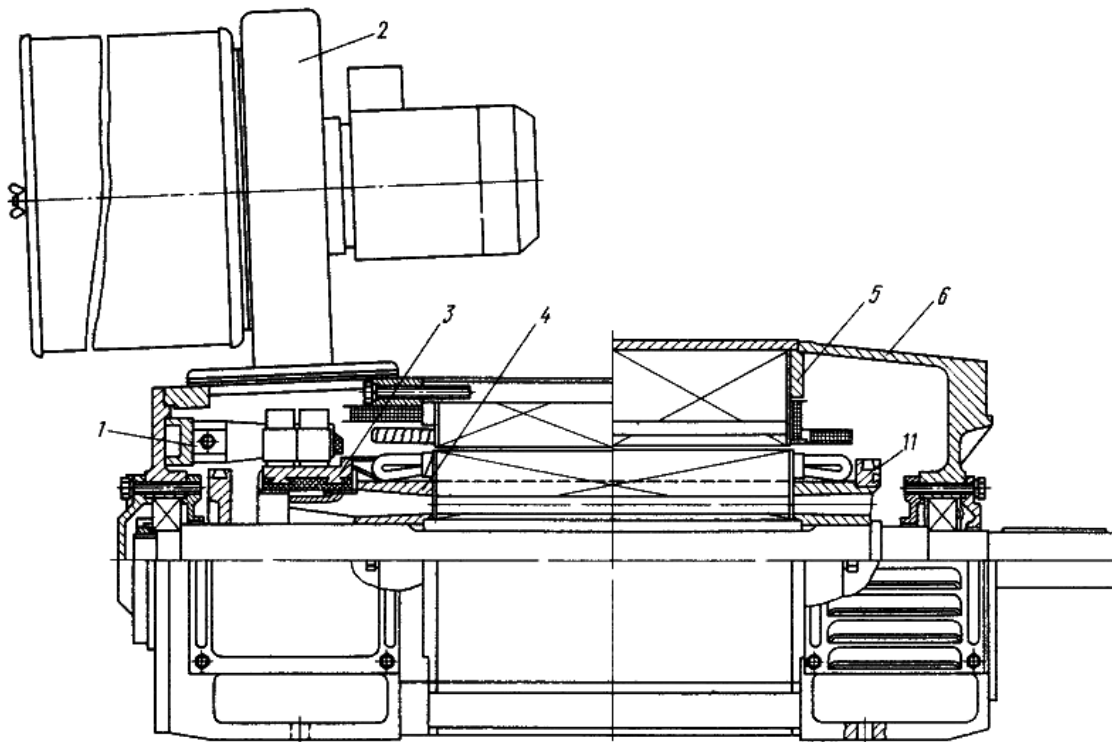
Двигуни у нагрітому стані при номінальному струмі збудження витримують перевантаження по струму якоря протягом 10с за цикл не менш ніж  $1x$  до  $2I_N$ .

Форми виконання двигунів за способом монтажу – IM081, IM2181, IM3081.

Для двигунів 4П встановлюються такі показники надійності й довговічності (при роботі в номінальному режимі): середній термін служби при наробітку 30000 год – не менш ніж 12 років; наробіток обмоток – 20000 год; імовірність безвідмовної роботи за період 10000 год – не менш ніж 0,8 при довірчій імовірності 0,7; наробіток щіток – 2000 год; коефіцієнт готовності – 0,9.

### ***Широкорегульовані електродвигуни типу 4ПФ***

Двигуни типу 4ПФ призначені для приводів механізмів головного руху верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ), гнучких виробничих систем і роботизованих виробничих комплексів. Виконання ДПС за ступенем захисту – IP23, за способом охолодження – IC06 (з незалежною вентиляцією); кліматичне виконання й категорія розміщення – УХЛ4 або О4.



*Рис. 1.4.  
Двигун  
постійного струму  
серії 4П*

*з висотою осі обертання  
180 мм типу 4ПФ:*

- 1 – траверса;*
- 2 – вентилятор з незалежним приводом;*
- 3 – колектор;*
- 4 – обмоткоутримувач;*
- 5 – натискна плита;*
- 6 – підшипниковий щит;*
- 7 – обмотка компенсаційна;*
- 8 – додатковий полюс;*
- 9 – статор;*
- 10 – обмотка паралельного збудження;*
- 11 – балансувальне кільце*

В умовній позначці ДПС після назви типу (4ПФ) вказується послідо-

вно висота осі обертання, мм, умовна довжина осердя (букви *S*, *M* або *L*), наявність повітряного фільтра – буква *B* (за відсутності фільтра буква опускається), розташування вентилятора (на бічній поверхні зверху – буква *B*, на торцевій поверхні з боку колектора – буква *T*), кліматичне виконання й категорія розміщення.

Середній рівень шуму ДПС з номінальною частотою обертання до 900 об/хв відповідає класу 1; ДПС з номінальною частотою обертання 900 об/хв і вище – класу 2.

Двигуни виконані з шихтованим магнітопроводом станини й компенсаційною обмоткою, можуть комплектуватися фільтром для очищення охолоджувального повітря при незалежній вентиляції.

Двигуни поставляються з вбудованими тахогенераторами типу ТП80-20-0,2 і датчиком теплового захисту – терморезистором типу СТ 14-1Б. Збудження ДПС незалежне, розраховане при послідовному з'єднанні котушок на живлення 220 В и при з'єднанні котушок збудження у дві паралельні гілки – на 110 В. Клас нагрівостійкості ізоляції обмоток – F.

Двигуни типу 4ПФ (рис. 1.4) мають статор восьмигранного перерізу, який набирається з листів електротехнічної сталі марки 2013 завтовшки 0,5 мм. Він запресований між двома натискними плитами завтовшки 10 мм зі сталевого прокату.

В осьовому напрямку пакет статора стягнутий шпильками й приварений у кутах по накладних планках, що забезпечують його поперечну міцність. У натискних плитах виконуються замкові поверхні, що центрують, і різьбові отвори для болтів кріплення підшипникових щитів.

Обмотки статора намотуються машинним способом: паралельного збудження – безпосередньо на полюс, компенсаційна – роздільним способом шляхом втягування її в пази.

Котушки додаткових полюсів виготовляються традиційно – машинне шаблонне намотування й ручна установка на полюс.

Просочення обмоток статора виконується вакуумно-нагнітальним способом лаком УР9144. Для забезпечення інтенсивної вентиляції в обмоткоутримувачах і в осерді якоря передбачені аксіальні канали.

Підшипникові щити – литі чавунні. Лапи виконуються на підшипникових щитах.

Траверса традиційної конструкції з плоскими штирями. Щіткотримачі – радіальні уніфікованої конструкції. Щітки марки ЕГ-74.

Двигуни допускають регулювання частоти обертання напругою якоря в діапазоні від 0 до 460 В при постійному моменті, при цьому допускається нерухомий стан з моментом, рівним половині номінального, і регулювання частоти обертання до максимальної ослабленням поля при номінальній напрузі на якорі в діапазоні не менш ніж 1:3 при постійній потужності.

Двигуни витримують навантаження по струму при номінальній частоті обертання –  $1,6I_H$  протягом  $1\text{хв}$  і  $2I_H$  протягом  $15\text{с}$ ; при максимальній частоті обертання –  $1,5I_H$  протягом  $10\text{с}$ .

Двигуни з висотами осі обертання  $132\dots180\text{ мм}$  мають конструктивне виконання за способом монтажу IM2001, IM2011, IM2031, з висотою осі обертання  $112\text{ мм}$  – IM2101, IM2111, IM2131; з висотами осі обертання від  $200$  до  $250\text{ мм}$  – IM1001, IM1002, IM1011, IM1031, IM2001, IM2011, IM2031.

Двигуни допускають зчленування з приводним механізмом будь-яким способом, що забезпечує нормальну роботу підшипників.

### ***Двигуни серії 4П для тяжких умов експлуатації (4П355–4П450)***

Двигуни призначені для експлуатації в електроприводах великих металорізальних верстатів, механізмів металургійного виробництва з частими пусками, зупинками, реверсами, з різкими накиданням й нерівномірністю навантаження; розраховані на живлення від напівпровідникових перетворювачів або електромашинних агрегатів. Припустимий коефіцієнт пульсації струму –  $7\%$  при зміні частоти обертання від номінальної до максимальної.

В умовній позначці двигунів після найменування серії (4П) послідовно вказується таке:

- висота осі обертання, *мм*;
- кількість щіток на колекторі;
- потужність при основній напрузі, *кВт*;
- кліматичне виконання (У або Т);
- категорія розміщення.

ДПС з висотою обертання  $450\text{ мм}$  можуть виготовлятися на напруги  $440, 750, 930\text{ В}$ , з висотою осі обертання  $355\text{ мм}$  – на напруги  $600$  і  $750\text{ В}$ .

Незалежне збудження ДПС при напрузі  $220\text{ В}$ . Від обмотки збудження виведено чотири кінці для перемикання напруги з  $220$  до  $110\text{ В}$ .

Двигуни допускають перевантаження по струму якоря:

- при номінальній частоті обертання:  $1,1I_H$  протягом  $2\text{ год}$ ;  
 $1,5I_H$  протягом  $60\text{ с}$ ;  $2,25I_H$  протягом  $15\text{ с}$ ;
- при максимальній частоті обертання:  $1,37I_H$  протягом  $60\text{ с}$ ;  
 $1,8I_H$  протягом  $15\text{ с}$ .

Максимальна припустима швидкість зміни струму якоря дорівнює  $100I_H$  на секунду.

Двигуни допускають роботу в режимах  $S3\dots S8$  при зазначених вище

значеннях і тривалості короточасних перевантажень; середньоквадратичне значення струму якоря при цьому не повинне перевищувати значення, установленого для режиму S1. Перевантаження по струму якоря, при якому ДПС відключається захистом, складає  $2,5I_H$ .

Двигуни мають форму виконання IM1003 або IM1004. Вони виконуються з тахогенератором постійного струму й реле швидкості.

Двигуни виконані з примусовою вентиляцією від стороннього вентилятора.

Ступінь захисту двигунів IP44. Двигун з примусовою вентиляцією й виходом охолоджуючого повітря через жалюзі, що зачиняються самостійно.

### 1.3. Порівняльні показники серій двигунів постійного струму

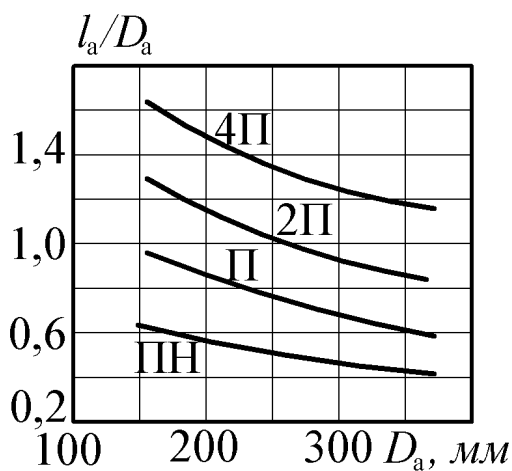


Рис. 1.5. Відношення  $l_a/D_a$

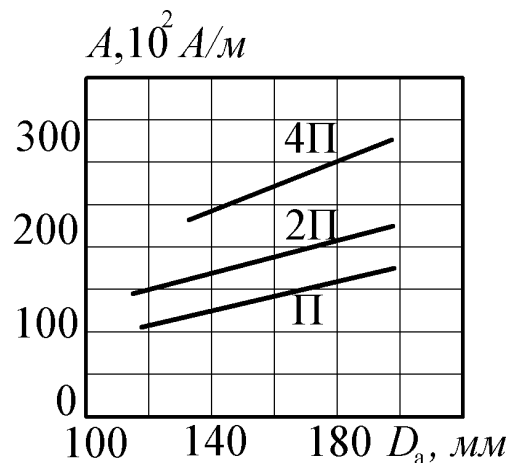


Рис. 1.6. Лінійне навантаження якоря

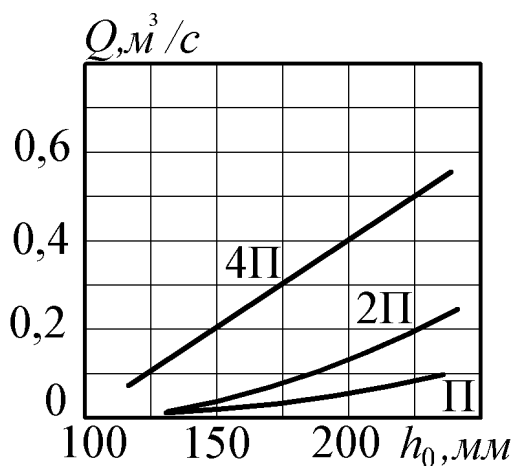


Рис. 1.7. Витрата охолоджуючого повітря

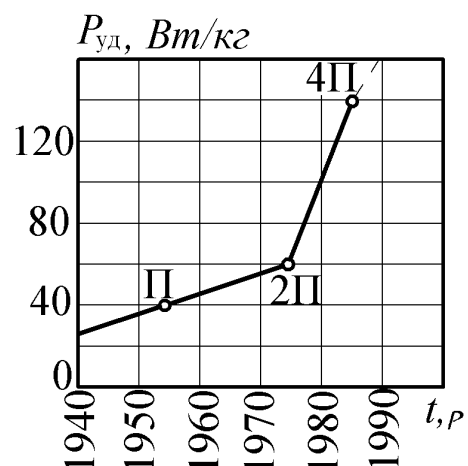


Рис. 1.8. Динаміка зміни питомої потужності

### 1.4. Серія 5П

Електродвигуни серії 5П типу 5ПБ100–5ПБ160 і 5ПН132–5ПН160 призначені для роботи в регульованих електроприводах з живленням від напівпровідникових перетворювачів, у т. ч. у приводах, оснащених систе-



мами автоматичного керування, контролю й діагностики із застосуванням мікропроцесорної техніки.

### **Основні параметри**

Режим роботи електродвигунів тривалий  $S1$ , допускає роботу в режимах  $S2...S8$  за умови, що середньоквадратичний струм за цикл не перевищує номінальне значення.

Електродвигуни поставляються з вбудованим тахогенератором ТП75-20-02 і датчиком теплового захисту – терморезистором СТ 14-1Б.

Таблиця 1.3

### **Структура умовної позначки**

5П\_Б\_160\_М\_УХЛ4

5П	позначення серії машини	
Х	позначення машини залежно від виконання за ступенем захисту й способом охолодження:	
	Н	захищене IP23 із самовентиляцією IC01
	Б	закрите IP44 з природним охолодженням IC0041
XXX	висота осі обертання, мм	
Х	умовна довжина осердя якоря:	
	$S, S1, M$	перша довжина
	$S2, L$	друга довжина
Г	наявність тахогенератора	
УХЛ4	кліматичне виконання й категорія розміщення	

### **1.5. Прокатні двигуни постійного струму**

Для живлення прокатних ДПС електроприводів з регульованою частотою обертання застосовують тиристорні перетворювачі, що забезпечує можливість використання швидкодіючих систем регулювання для форсування напруги якоря. У зв'язку з цим до ізоляції обмоток якірного кола й колектора ДПС висувається додаткова вимога: вона повинна допускати нормальну експлуатацію з амплітудним значенням напруги вентильної обмотки трансформатора перетворювача. Для ДПС з номінальною напругою 930 В ця напруга становить 1500 В. Така напруга впливає на потенційні умови на колекторі.

Для обмеження шкідливого впливу тиристорного перетворювача ДПС виконують із шихтованим магнітопроводом і застосовують 12-фазні схеми випрямлення (рідше 6-фазні). Для станів гарячої прокатки реверсування ДПС здійснюється шляхом зміни знака напруги на якорі.

При проектуванні ДПС задаються припустимими пульсаціями струму якоря, як правило, у межах від 2 до 7 %. У більшості випадків індукти-

вність якiрного кола виявляється достатньою для обмеження заданого значення пульсації.

ДПС поставляються з тахогенератором типу ПТ-32 або ПТ-42, реле швидкості типу РМН7011, повітроохолоджувачем типу В-100-2 або В-150А.

Для контролю температури вхідного й вихідного з ДПС повітря поставляються два термометри опору, для контролю роботи підшипників – термометр манометричний й показчик рівня масла. Температура обмотки збудження й компенсаційної контролюється термоелектричними перетворювачами. В обмотку якоря закладені термометри опору, що дозволяє стежити за її температурою при роботі.

## 1.6. Тягові електричні машини

### *Тягові двигуни для міського електротранспорту*

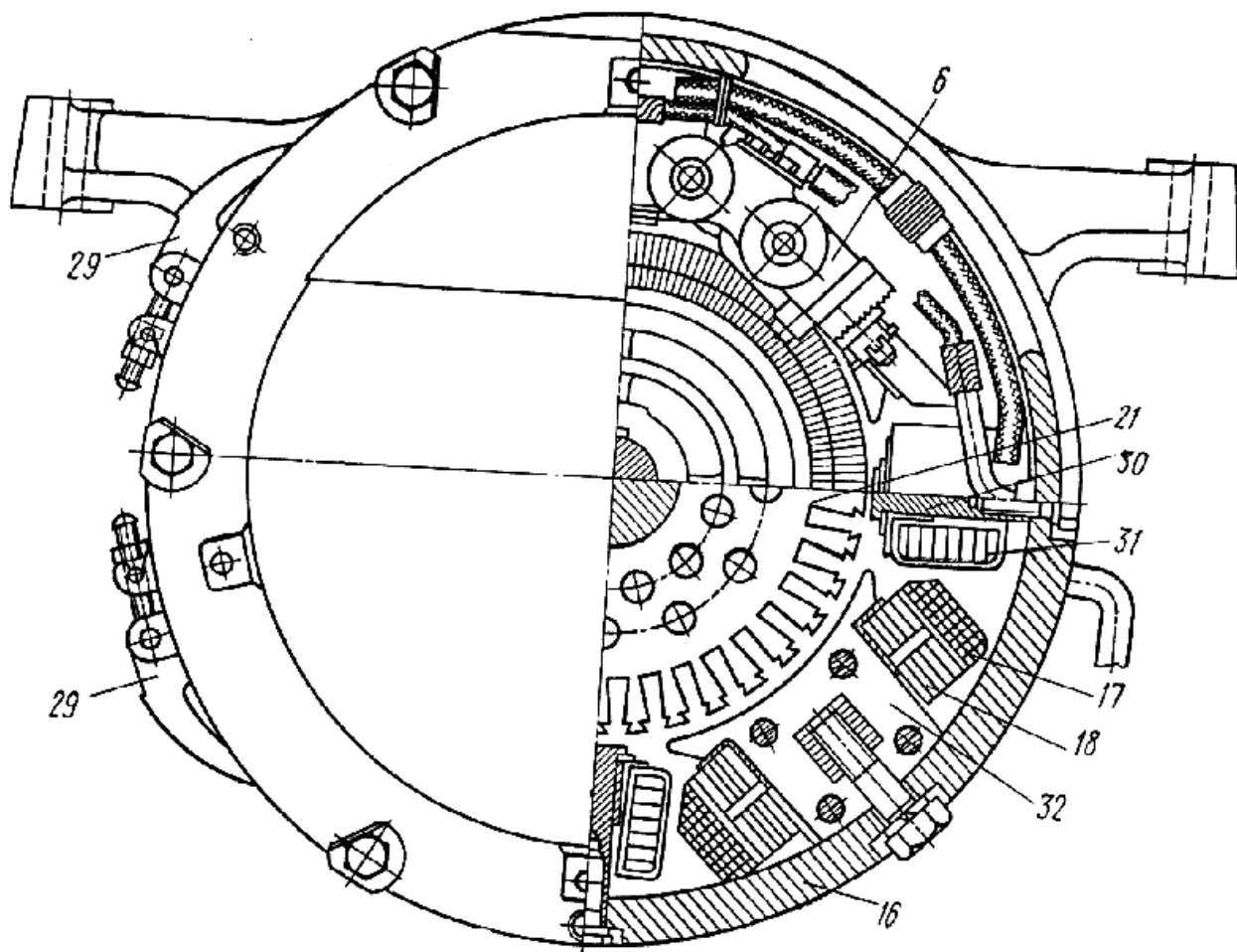
Таблиця 1.4

Технічні дані тягових двигунів

Тип двигуна	ЗАЛ 2943г	ДК 211А	ТЕ 023	ЭД 138У2	ДК210А3
Збудження	послідовне			змішане	
Напруга, В	600	550	300	550	550
Годинна потужність, кВт	115	150	45	132	110
Струм годинного режиму, А	208	300	150	260	220
Частота обертання, об/хв	1500	1750	1750	1750	1500
Макс. частота обертання, об/хв	-	3900	3400	3900	3900

До тягових електричних машин (ТЕД) висуваються такі вимоги:

- електрична стійкість – здатність автоматично прямувати до стану електричної рівноваги при зміні режиму роботи;
- механічна стійкість – здатність автоматично наближатися до стану динамічної рівноваги;
- здатність витримувати перевантаження, що спричинені частими пусками, застосуванням електричного гальмування, рухом на підйомі, рухом при переповненому вагоні, коливанням напруги в мережі;
- рівномірний розподіл навантаження між паралельно працюючими двигунами;
- найменший вплив на енергосистему;
- можливість плавного регулювання швидкості та застосування рекуперативного гальмування;
- простота конструкції.



*Рис. 1.9,а. Поперечний розріз тягового двигуна ДК-210А3:*

- 1 – паз якоря; 2, 4, 26, 27 – підшипникові кришки; 3 – роликовий підшипник; 5 – кільцева гайка; 6 – кронштейн щіткотримача; 7 – вентиляційний патрубок; 8, 24 – підшипникові щити; 9, 14, 22 – притискна шайба; 10 – прокладка; 11 – колекторна втулка; 12 – обойма щіткотримача; 13 – колекторна пластина; 15 – кришка люка; 16 – корпус; 17, 18 – котушки головного полюса; 19 – шпилька; 20 – обмотка якоря; 21 – пакет якоря; 23 – вентиляційні вікна; 25 – вентилятор; 28 – шарикопідшипник; 29 – замки кришок люків; 30 – осердя додаткового полюса; 31 – котушка додаткового полюса; 32 – осердя головного полюса

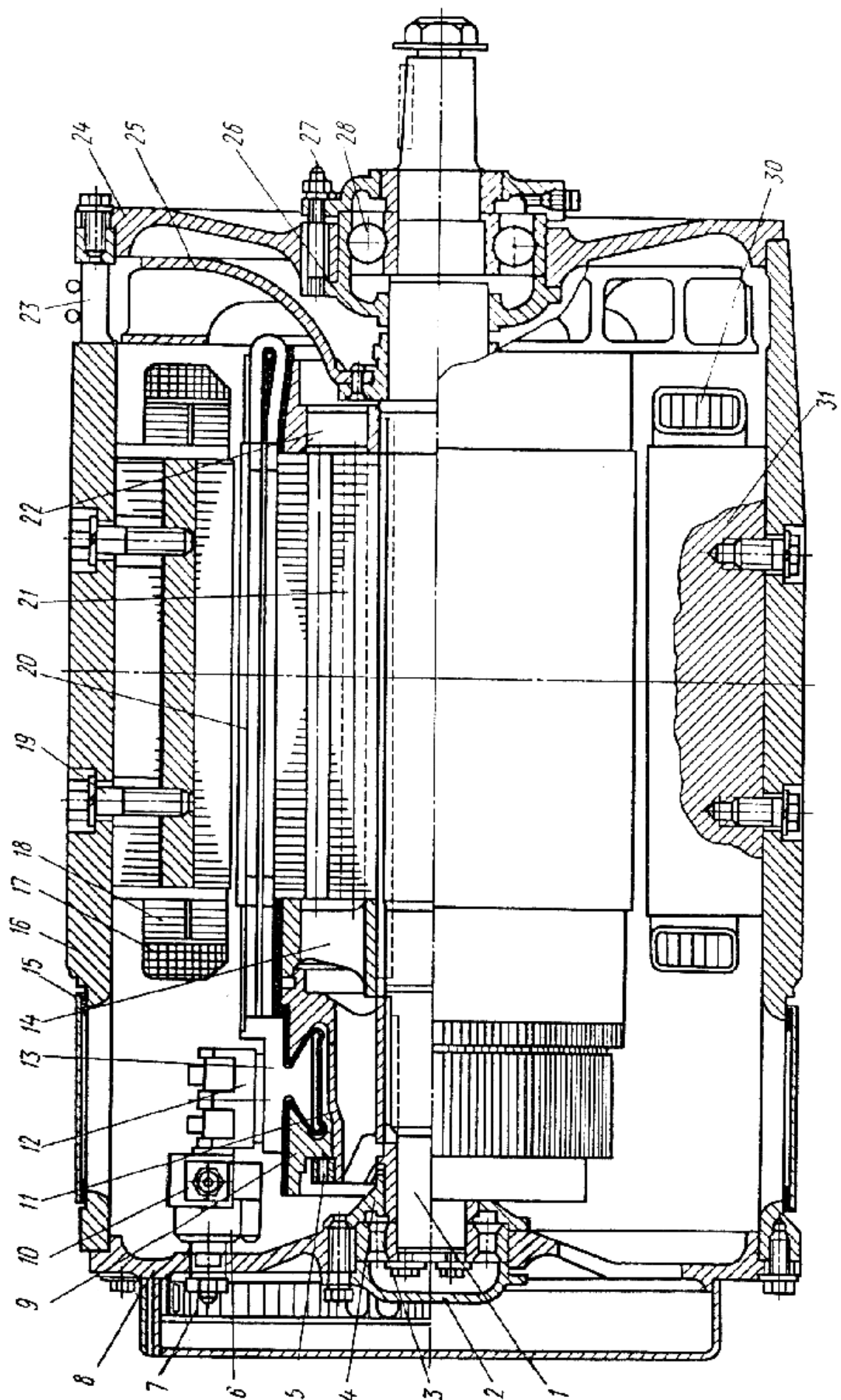


Рис. 1.9, б. Поздовжній розріз тягового двигуна ДК-210А3

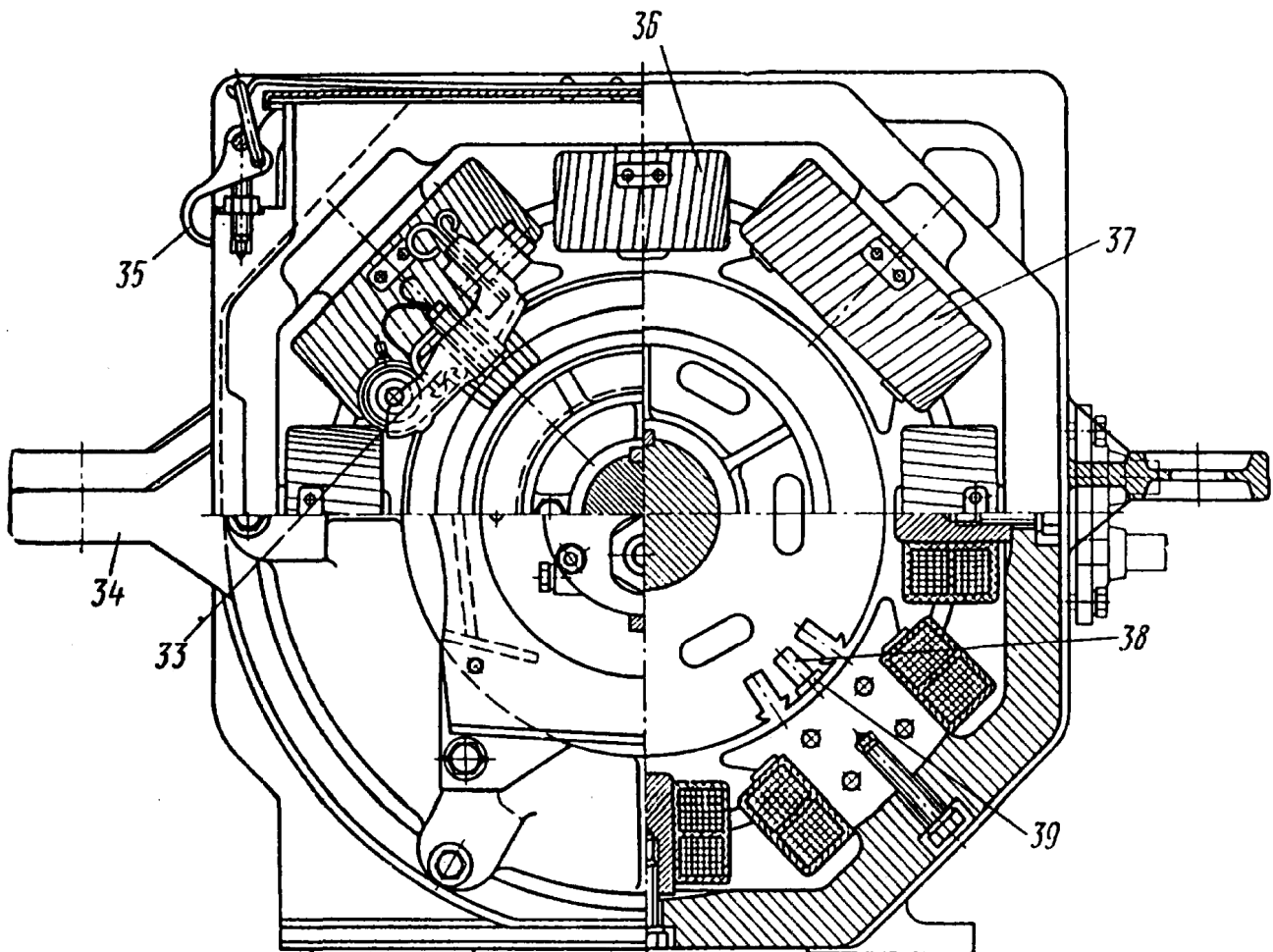


Рис. 1.10, а. Поперечний розріз тягового двигуна ЗАЛ-2943г:  
 1 – коробка передач приводу тахографа; 2 – кронштейн; 3 – диск;  
 4 – болт шків; 5 – шків; 6, 17 – підшипникові щити;  
 7 – натискний конус; 8, 26 – кришки верхнього й нижнього люків;  
 9 – колектор; 10 – бандаж зі сталевого дроту;  
 11 – обмотка збудження головного полюса;  
 12 – осердя головного полюса; 13 – корпус; 14 – осердя додаткового полюса;  
 15 – лобова частина обмотки якоря; 16 – ковпак патрубку;  
 18 – маслянка; 19, 31 – підшипники якоря; 20 – кришка;  
 21, 25 – натискні шайби; 22 – лапа; 23 – пакет осердя; 24 – вал якоря;  
 27 – болт; 28 – вентилятор; 29 – дротове загородження;  
 30 – вентиляційний отвір; 32 – розприскувач; 33 – щіткотримач;  
 34 – кронштейн; 35 – пружинний замок; 36 – обмотка додаткового полюса;  
 37 – обмотка головного полюса; 38 – паз якоря; 39 – текстолітовий клин

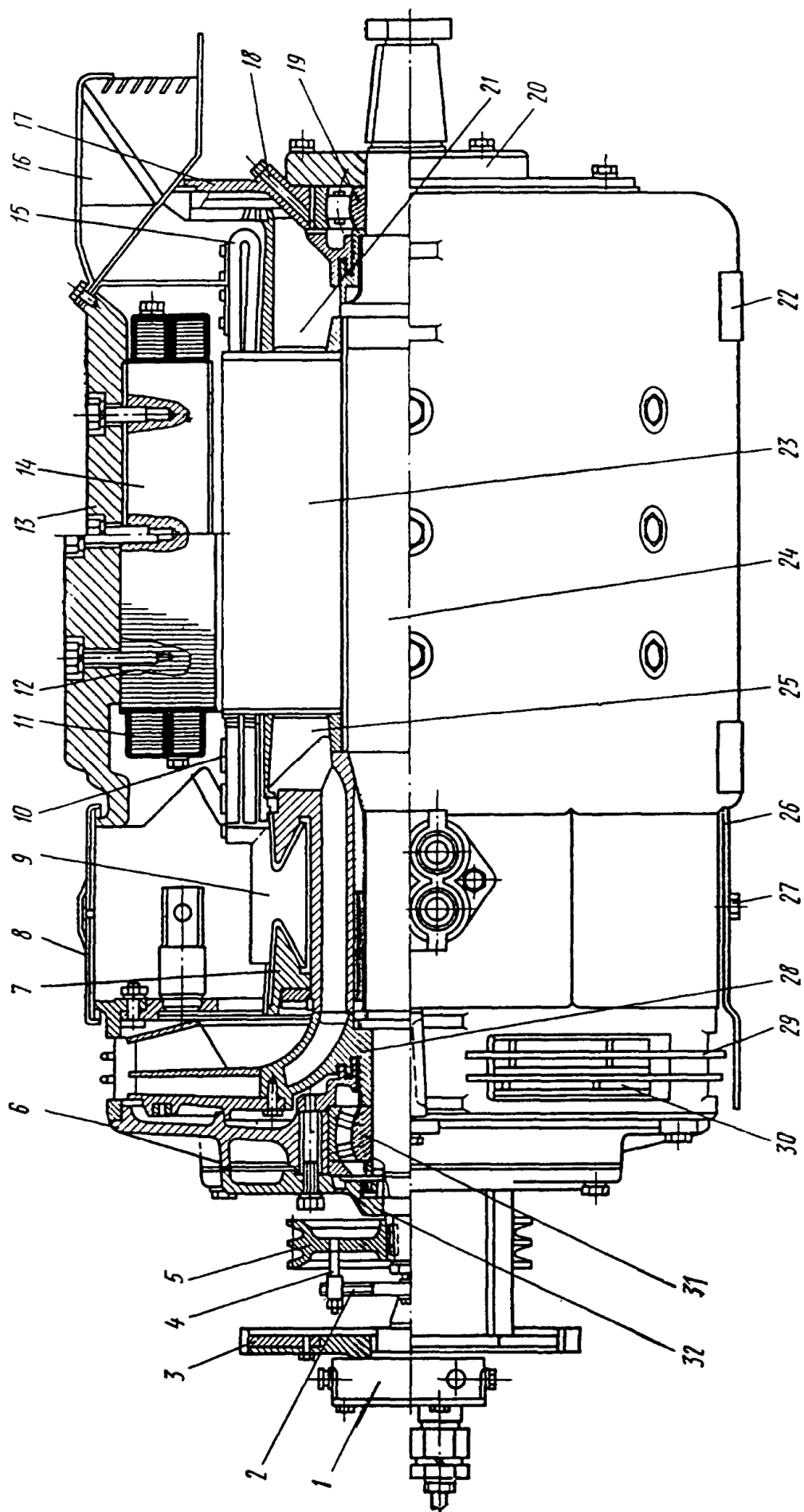


Рис. 1.10, б. Поздовжній розріз тягового двигуна ЗАЛ-2943г

## Тягові електродвигуни для підлогового електротранспорту

Таблиця 1.5

Показники електродвигунів для підлогового електротранспорту

<p style="text-align: center;">МТ-4; МТ-4ЭПМ; МТ-6; МТ-8</p> <p>Електродвигуни реверсивні, закритого типу, брзкозахищені для роботи в електроприводах механізмів пересування електровізків, електронавантажувачів, самохідних трапів в аеропортах, технологічних лініях і т. п.</p>																																																	
<p style="text-align: center;">ПТ-3,6; ПТ-6,3</p> <p>Електродвигуни реверсивні з послідовним збудженням для приводів механізмів пересування електровізків типу ЕП-006.2, ЕС-1.2 і електронавантажувачів типу ЕВ-717, ЕВ-687</p>																																																	
<p style="text-align: center;">ПН-7,5-2С</p> <p>Електродвигун реверсивний зі змішаним збудженням для привода гідронасоса електронавантажувачів типу ЕП-1616, ЕВ-717</p>																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Параметри / Тип</th> <th style="width: 10%;">МТ-4</th> <th style="width: 10%;">МТ-4ЭПМ</th> <th style="width: 10%;">МТ-6</th> <th style="width: 10%;">МТ-8</th> <th style="width: 10%;">ПТ-3,6</th> <th style="width: 10%;">ПТ-6,3</th> <th style="width: 10%;">ПН-7,5-2С</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Напруга живлення, В</td> <td>31</td> <td>48</td> <td>40/48</td> <td>48</td> <td colspan="2">75</td> <td>40/48</td> </tr> <tr> <td>Потужність на валу, кВт</td> <td>1,5</td> <td>4,2</td> <td>3,5/4,1</td> <td>6</td> <td>3,6</td> <td>6,3</td> <td>7,5/9</td> </tr> <tr> <td>Споживаний струм, А</td> <td>75</td> <td>110</td> <td>115</td> <td>165</td> <td>63</td> <td>115</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>Частота обертання, об/хв</td> <td>1200</td> <td>1750</td> <td>1450 / 1700</td> <td>1700</td> <td colspan="2">1400</td> <td>2200 / 2600</td> </tr> <tr> <td>Маса, кг</td> <td colspan="2">86</td> <td>90</td> <td>75</td> <td>72</td> <td>74</td> <td>67</td> </tr> </tbody> </table>	Параметри / Тип	МТ-4	МТ-4ЭПМ	МТ-6	МТ-8	ПТ-3,6	ПТ-6,3	ПН-7,5-2С	Напруга живлення, В	31	48	40/48	48	75		40/48	Потужність на валу, кВт	1,5	4,2	3,5/4,1	6	3,6	6,3	7,5/9	Споживаний струм, А	75	110	115	165	63	115	250	Частота обертання, об/хв	1200	1750	1450 / 1700	1700	1400		2200 / 2600	Маса, кг	86		90	75	72	74	67	
Параметри / Тип	МТ-4	МТ-4ЭПМ	МТ-6	МТ-8	ПТ-3,6	ПТ-6,3	ПН-7,5-2С																																										
Напруга живлення, В	31	48	40/48	48	75		40/48																																										
Потужність на валу, кВт	1,5	4,2	3,5/4,1	6	3,6	6,3	7,5/9																																										
Споживаний струм, А	75	110	115	165	63	115	250																																										
Частота обертання, об/хв	1200	1750	1450 / 1700	1700	1400		2200 / 2600																																										
Маса, кг	86		90	75	72	74	67																																										

### 1.7. Регульовальна здатність двигунів постійного струму

Як інтегральний показник регулювальної здатності ДПС розглядається [6] діапазон  $D$  регулювання частоти обертання від  $n_{\min}$  до  $n_{\max}$ . Діапазон  $D$  забезпечується зміною напруги на затискачах якоря  $-D_u$  (точки 1-2) і ослабленням магнітного потоку  $-D_\phi$  (1-4 на рис. 1.11).

Для якісної оцінки регулювання враховується діапазон  $D_p$ , який досягається ослабленням магнітного потоку при  $P_H = \text{const}$  (1-3 на рис. 1.11), та ступінь використання номінальної потужності в режимі максимальної частоти обертання  $-k_p$  (рис. 1.12).

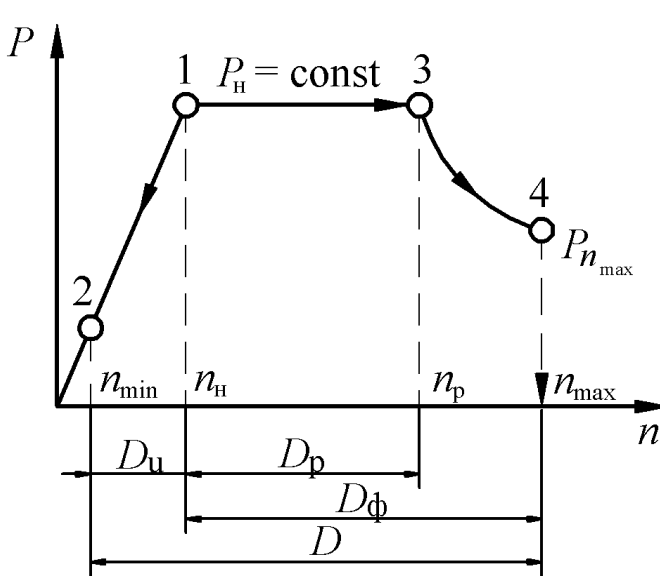


Рис. 1.11.  $D_p$  при  $P_H = \text{const}$

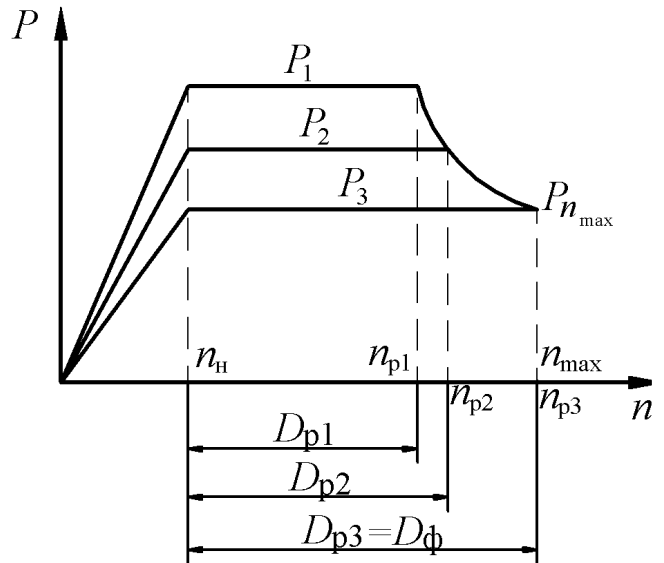


Рис. 1.12.  $D_p$  при  $P = \text{var}$

Для ДПС величина діапазону  $D_\phi$  знаходиться на рівні до 1:5, діапазон  $D_p$  – до 1:4.

Добуток номінальної потужності, діапазону регулювання, ступеня використання номінальної потужності пропорційний реактивній електро рушійній силі (ЕРС) і називається фактором граничності

$$PP = P_H \cdot k_p \cdot D_\phi \equiv e_{r \max} \cdot \quad (1.1)$$

Потенційні умови колектора, які можуть приводити до виникнення на ньому колового вогню, є чинником, що обмежує використання номінальної потужності ДПС при  $n_{\max}$  та істотно знижує експлуатаційну надійність.



## 2. СТАНДАРТИ В ЕЛЕКТРОМАШИНОБУДУВАННІ

При формуванні технічного завдання на проектування необхідно враховувати вимоги стандартів.

### *Установочно-приєднувальні розміри*

ЕМ проектують на одне зі значень висоти осі обертання ( $h_0$ ):

25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000 мм.

На кожній осі обертання може бути виготовлено до трьох типорозмірів ЕМ:  
 $S$  – коротка,  $M$  – середня,  $L$  – довга.

### *Ступені захисту ЕМ (позначення – IP)*

Для МПС найпоширенішими є такі ступені захисту:

- IP00 – відкрита ЕМ;
- IP22 (IP23) – ЕМ, захищена від влучення усередину предметів діаметром понад 12,5 мм, а також від влучення крапель дощу під кутом не більше ніж  $15^\circ$  до вертикалі для IP22 і не більше ніж  $60^\circ$  до вертикалі для IP23;
- IP44 – ЕМ закритого виконання, захищена від влучення усередину предметів діаметром понад 1 мм і від бризків під будь-яким кутом.

Перша цифра – ступінь захисту персоналу від зіткнення зі струмоведучими й обертовими частинами й від влучення усередину ЕМ предметів, друга – позначає ступінь захисту від проникнення води усередину ЕМ.

### *Способи охолодження ЕМ (позначення – IC)*

- IC00 – ЕМ з природним охолодженням (IC0041 – для виконання IP44).
- IC01 – ЕМ виконання IP22 з охолодженням від вентилятора, розташованого на валу машини (IC0141 – для виконання IP44).
- IC05 (IC0541) – охолодження ЕМ незалежним вентилятором, розташованим по осі машини.
- IC06 (IC0641) – охолодження ЕМ незалежним вентилятором, розташованим зверху у вигляді наїзника.
- IC13, IC17 – два варіанти незалежного охолодження ЕМ, причому IC13 – охолоджувальний пристрій, прибудований до ЕМ, IC17 – холодоагент підводиться по повітропроводу, а пристрій охолодження знаходиться на деякій відстані від ЕМ.

### *Конструктивне виконання ЕМ (позначення – IM X\_YY\_Z)*

- X – конструктивне виконання ЕМ ( $X = 1 \dots 9$ ):  
1 – на лапах з підшипниковими щитами;

- 2 – на лапах з підшипниковими щитами, з фланцем на підшипниковому щиті;
- 3 – без лап з підшипниковими щитами, з фланцем на підшипниковому щиті;
- 4 – без лап з підшипниковими щитами, з фланцем на станині;
- 5 – без підшипникових щитів;
- 6 – на лапах з підшипниковими щитами та стояковими підшипниками;
- 7 – на лапах зі стояковими підшипниками (без підшипникових щитів);
- 8 – з вертикальним валом;
- 9 – спеціальне виконання.

- $YU = 00$  – визначає горизонтальне виконання ЕМ;  $YU = 01$  – вертикальне.
- $Z$  – конструктивне виконання кінця вала машини ( $Z = 0 \dots 8$ ):
  - 0 – без виступаючого кінця вала;
  - 1 – з одним виступаючим кінцем вала циліндричної форми;
  - 2 – з двома виступаючими кінцями вала циліндричної форми;
  - 3 – з одним виступаючим кінцем вала конічної форми;
  - 4 – з двома виступаючими кінцями вала конічної форми;
  - 5 – з одним виступаючим фланцевим кінцем вала;
  - 6 – з двома виступаючими фланцевими кінцями вала;
  - 7 – з двома виступаючими кінцями вала, з боку привода – фланцевим, з протилежної сторони – циліндричним;
  - 8 – усі інші виконання виступаючих кінців вала.
- IM1001 – на лапах з двома підшипниковими щитами, кінець вала циліндричний, спрямований горизонтально, лапи звернені вниз.
- IM1011 – на лапах з двома підшипниковими щитами, кінець вала циліндричний, спрямований вертикально вниз.
- IM2101 – на лапах з двома підшипниковими щитами, з фланцем, кінець вала циліндричний, спрямований горизонтально, лапи звернені вниз.

***Кліматичне виконання й характеристика  
місця експлуатації ЕМ (позначення –  $Y_Z$ )***

- $Y = Y$  – помірний клімат;  $Y = ХЛ$  – холодний клімат;  $Y = ТС$  – сухий тропічний клімат;  $Y = ТВ$  – вологий тропічний клімат;  $Y = О$  – для всіх кліматичних районів на суші;  $Y = М$  – помірно-холодний морський клімат;  $Y = В$  – для всіх кліматичних районів на суші й на морі.
- $Z = 1, 2$  – можлива експлуатація на повітрі;  $Z = 3, 4$  – експлуатація в закритих приміщеннях.

### 3. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

#### 3.1. Електроізоляційні матеріали

Електроізоляційні матеріали (табл. 3.1) розділяються за нагрівостійкістю на 7 класів, що характеризуються гранично припустимою температурою.

Клас нагрівостійкості	Y	A	E	B	F	H	C
Припустима температура, °C	90	105	120	130	155	180	> 180

Таблиця 3.1

Електроізоляційні матеріали для ізоляції ДПС

Тип ізоляції	Класи нагрівостійкості <i>B, F</i>	Клас нагрівостійкості <i>H</i>
1	2	3
<b>Якірна обмотка</b>		
Виткова ізоляція	ЛСЕП -934-ТПл Елмікатерм 524019	Провід ПСДКТ Провід ПШИПК-2 ПМ-40
Корпусна ізоляція ко- тушок	Елмікатерм 524019 ЛСЕП-934-ТПл ЛСУ, ЛСМ	ЛСПМ Елмікатерм 529029
Пазова ізоляція: - пазова коробка - клин пазовий	Ізофлекс 191 Сінтофлекс 515 Сінтофлекс 616 СТЕФ	Імідофлекс 292 Сінтофлекс 818Н Сінтофлекс 828 СТ-ЕТФ
Міжшарова ізоляція колектора	КИФЕ, КИФЕ-А Елмікапласт 1440	КИФЕ-КИФЕ-Н КИФК Елмікапласт 1440
Колекторні манжети	Елмікаформ 323 Пл Елмікаформ 324 Пл	Елмікаформ 325, 325 ПМ ФИФК-ТПл
Бандаж	ЛСБЕ-155	ЛСБЕ-180
Міжшарова ізоляція	Елміка 423 СТЭФ	Елміка 425
Просочувальні состави	ФЛ-98, МЛ-92, ПЭ-933 Компаунд епоксидно- ангідридний ПК-11	ДО-916 Компаунд поліефірамідний Елком-200

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3
<b>Статорна обмотка</b>		
Котушки головного й додаткового полюсів		
Виткова ізоляція	Елмікафлекс 4430 Елмікафлекс 44309	Елмікафлекс 4450 Елмікафлекс 44509
Корпусна ізоляція	Елмікатерм 524019 ЛСКН-160-ТТ (для технології вакуум-нагнітального просочення)	ЛСПМ Елмікатерм 529099
<b>Компенсаційна котушка</b>		
Виткова ізоляція	Елмікатерм 524019	ПМ-40
Корпусна ізоляція	Елмікатерм 524019	ПМ-40
Пазова ізоляція	Ізофлекс 191 Сінтофлекс 515 Сінтофлекс 616	Імідофлекс 292 Сінтофлекс 818Н Сінтофлекс 828

У позначенні марок стрічок Елмікатерм цифри означають:

- 5 (на першому місці) – стрічковий слюдяний матеріал;
- 2 (на другому місці) – слюдяний папір тип 2;
- 4 (на третьому місці) – епоксидне сполучне.
- 0 (на четвертім місці) – немодифіковане зв'язуюче;
- 1 (на п'ятому місці) – підкладка з поліефірної плівки;
- 9 (на шостому місці) – підкладка зі склотканини.

Цифри у позначенні марок слюдопластів Елмікапласт, Елмікафлекс :

- 1 (на першому місці) – колекторний слюдяний матеріал;
- 4 (на першому місці) – гнучкий слюдяний матеріал;
- 4 (на другому місці) – слюдяний папір тип 4;
- 3 (на третьому місці) – поліефірно-епоксидне зв'язуюче;
- 4 (на третьому місці) – епоксидне сполучення;
- 5 (на третьому місці) – кремнійорганічне зв'язуюче;
- 0 (на четвертому місці) – немодифіковане зв'язуюче;
- 9 (на п'ятому місці) – склотканина.

Позначенні марок матеріалів Ізофлекс, Імідофлекс, Сінтофлекс:

- 1 – плівка поліетіленерефталатна;
- 2 – плівка поліімідна;
- 5 – папір поліефірний;
- 6 – папір із суміші поліефірних і арамідних волокон;
- 8 – папір арамідний;
- 9 – тканина зі скляного волокна.

### 3.2. Магнітні матеріали

Якір МПС виконується з тонколистової холоднокатаної ізотропної сталі марок 2013, 2211, 2312, 2411.

Для головних полюсів застосовується листова конструкційна сталь завтовшки (1...2) мм або холоднокатана анізотропна сталь марки 3411 завтовшки 1 мм.

Характеристики намагнічування сталей наведені у Додатку А.

### 3.3. Обмотувальні проводи

#### *Класифікація за температурою*

Поняття «температурний індекс» (ТІ) чисельно дорівнює температурі, при якій протягом не менш ніж 20000 год пробивна напруга (або інший параметр) зберігається вище від певного заданого рівня. За значенням температурного індексу можна класифікувати обмотувальні проводи таким чином:

1 – з ТІ 105 (наприклад полівінілацеталева ізоляція й ізоляція на основі масляних лаків, просочений натуральний шовк, папір);

2 – з ТІ 120 (поліуретанова ізоляція; ізоляція з волокна лавсан і т. д.);

3 – з ТІ 130 (наприклад немодифіковані поліефірні лаки);

4 – з ТІ 155 (поліефіримідна ізоляція, скловолокниста ізоляція, просочена гліфталевами лаками, і т. д.);

5 – з ТІ 180 (наприклад скловолокниста ізоляція, просочена кремнійорганічними лаками, деякі модифіковані поліефіримідні лаки);

6 – з ТІ 200 (поліамідимідна ізоляція);

7 – з ТІ 220...240 (поліимідна ізоляція).

Для проводів більш високої нагрівостійкості температурні індекси не встановлюються, тому що при (250...300) °С и вище термін експлуатації обмотувальних проводів менш ніж 20 000 год.

Проводи з ТІ 105 призначені для обмоток електричних машин, апаратів загальнопромислового призначення, капсулів, реле, вимірювальних, регулювальних та інших приладів, для виготовлення транспонованих обмотувальних проводів масляних трансформаторів і енергетичних реакторів.

Проводи з ТІ 130 призначені для універсальних двигунів малої потужності, генераторів, електромагнітів і сухих трансформаторів.

Проводи з ТІ 155 призначені для силових двигунів, двигунів для домашніх електроприладів і електроінструментів, генераторів, соленоїдів, сухих трансформаторів, вимірювальних приладів, котушок і реле.

Проводи з ТІ 200 призначені для силових і тягових двигунів, сухих трансформаторів, генераторів, вимірювальних приладів, апаратури зв'язку, а також для холодильних установок і кондиціонерів, що працюють у середовищі фреонів (хладонів).

Проводи з ТІ понад 200 призначені для вибухозахищеного устаткування хімічної, газової, нафтопереробної й вугільної промисловості у випадку тривалих робочих температур (220...240) °С.

### ***Класифікація за типом ізоляції***

За видами ізоляції обмотувальні проводи можна класифікувати таким чином:

- обмотувальні проводи з емалевою ізоляцією або емальовані проводи, які мають більш тонку ізоляцію, що дозволяє збільшити коефіцієнт використання паза в електричних машинах і апаратах, підвищити їх потужність або знизити габарити електротехнічних пристроїв;
- обмотувальні проводи з волокнистою або комбінованою емалево-волокнистою ізоляцією, у т. ч. зі скловолокнистою й паперовою, використовуються в тягових електричних машинах, високовольтних двигунах, електродвигунах заглибних насосів нафтовидобутку;
- обмотувальні проводи з пластмасовою ізоляцією, включаючи плівкову, застосовуються для намотування заглибних електродвигунів насосів нафтовидобутку.

### ***Обмотувальні проводи з емалевою ізоляцією***

Виробництво емальованих проводів менш трудомістке порівняно з проводами, ізоляція яких накладається на дріт, наприклад методом обмотки.

Основна тенденція у виробництві емальованих проводів – збільшення обсягу випуску проводів з високоміцною й нагрівостійкою ізоляцією, розрахованою на експлуатацію при 130...180 °С, за рахунок скорочення випуску проводів на робочу температуру 105 °С, зокрема проводів з ізоляцією на основі масляних і полівінілацеталевих лаків. У той самий час неухильно зростає виробництво нагрівостійких емаль-проводів з поліефірною, поліефіримідною і поліімідною ізоляцією.

Емальовані проводи (Додатки Б, В) виготовляється з такими температурними індексами:

- 1) 105 – марки ПЕЛ, ПЕВ-1, ПЕВ-2, ПЕВП, ПЕВА, ПЕВА<sub>т</sub>, ПЕМ-1, ПЕМ-2, ПЕМП та ін.;
- 2) 120 – марки ПЕВТЛ-1, ПЕВТЛ-2, ПЕВТЛ та ін.;
- 3) 130 – марки ПЕТВ-1, ПЕТВ-2, ПЕТВ-2-ТС, ПЕТВП, ПЕТВМ та ін.;
- 4) 155 – марки ПЕТ-155, ПЕТМ та ін.;
- 5) 180 – марки ПНЕТ-імід та ін.;
- 6) 200 – марки ПЕТ-200, ПЕТП-200 та ін.

Проводи виготовляють алюмінієвими, мідними й нікельованими мідними. Нікельований мідний дріт застосовується для виготовлення нагрівостійких проводів з метою підвищення стійкості до окиснення.

Близько 95 % усіх проводів з емалевою ізоляцією випускають із за-

стосуванням синтетичних лаків, що утворюють високоміцні емалеві покриття. Найпоширенішим є лак вініфлекс (ВЛ-931), покриття якого не плавиться й не розм'якшується при нагріванні, зберігаючи гнучкість і еластичність. Лак металвін (ВЛ-941) забезпечує більш високу стійкість до впливу органічних розчинників і води.

Більш нагрівостійкі емалеві покриття утворюють лаки на основі поліефірних смол. Сировиною для одержання лаку ПЕ-943 є тарефталева кислота, етиленглицоль і гліцерин.

З метою поліпшення стійкості проводів з поліефірною ізоляцією до теплових ударів і підвищення нагрівостійкості використовуються модифіковані поліефірні лаки. Проводи з ізоляцією цими лаками за нагрівостійкістю відповідають класу F (155 °С) або H (180 °С). Максимальна нагрівостійкість ізоляції проводів забезпечується при застосуванні поліімідних з'єднань. Поліефіримідні лаки (ПЕ-955) мають більш високу нагрівостійкість (155...180 °С) порівняно з поліефірними (130 °С).

Поліуретановий лак УЛ-1 застосовується для проводів, що використовуються без попереднього зачищення ізоляції

Двошарова ізоляція проводів з емалевою ізоляцією являє собою два різні лаки, нанесені на провід послідовно.

Для пайки провідників застосовують олов'яно-свинцеві припої ПОС-90, ПОС-61, ПОС-50, ПОС-40, ПОС-30, ПОС-18.

Для виготовлення колекторів застосовується холоднокатана мідь або мідь із присадкою кадмію, яка має більшу механічну міцність і менше зношуванням на стирання.

### **3.4. Конструкційні матеріали**

- сірий чавун – СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ21-20, СЧ28-48 для виготовлення станин асинхронних і синхронних машин, підшипникових щитів;
- сталь пруткова (сталь 45) – для валів;
- сталь Ст3 – для корпусів і підшипникових щитів, додаткових полюсів;
- латунні прутки Л63, ЛС59-1, ЛС80-3Л – для щіткового вузла;
- сталевий бандажний дріт (магнітний і немагнітний).

## 4. ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Основні дані обмоток машин постійного струму (МПС) [14] зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Зведена таблиця властивостей обмоток якоря (ОЯ)

Тип ОЯ	$2a$	$y_1$	$y$	$y_K$	Примітка
Проста ПО	$2p$	$Z_e / 2p \pm \xi$	1	1	при $p = \text{парн.}$ , $Z_e = \text{парн.}$
<b>Зрівнювачі I роду</b>					
Скл. ПО	$2pm$	$Z_e / 2p \pm \xi$	$m$	$m$	при $K = \text{н/парн.}$ – однократно замкнена; при $K = \text{парн.}$ – дворазово замкнена
<b>Зрівнювачі I і II роду</b>					
Проста ХО	2	--“--	$\frac{(K \pm 1)}{p}$	$\frac{(K \pm 1)}{p}$	при $p = \text{парн.}$ , $Z_e = \text{н/парн.}$
Скл. ХО	$2m$	--“--	$\frac{(K \pm m)}{p}$	$\frac{(K \pm m)}{p}$	при $p = \text{парн.}$ , $m = \text{парн.}$ $Z_e = \text{н/парн.}$ Якщо $Z_e$ й $2p$ взаємно прості числа, то ХО од- нократно замкнена, ін- акше дворазово замкнена.
<b>Зрівнювачі II роду</b>					
Ком- біно- вана	$2p$	$Z_e / 2p \pm \xi$		$y_{КП} = 1$	<b>Проста ПО</b>
	$2m$ $= 2p$	$2\tau - y_{1П}$		$K / p - 1$	<b>ХО</b>
	$4p$	$y_{1П} + y_{1В}$ $= 2\tau$		$y_{КП} + y_{КВ}$ $= K / p$	Зрівнювачів немає

Обмотка якоря (ОЯ) повинна задовольняти такі вимоги:

- ОЯ повинна бути розрахована на задані величини напруги й струму;
- ОЯ повинна мати достатню електричну, механічну й термічну міцність;



- конструкція ОЯ повинна забезпечувати задовільні умови струмознімання з колектора;
- витрати міді на ОЯ повинні бути мінімальними;
- технологія виготовлення ОЯ повинна бути за можливості простою.

Для одержання симетричної ОЯ необхідно, щоб відношення  $\frac{Z_e}{a} = \frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{Z \cdot u_{\Pi}}{a}$  було цілим числом (ц. ч.).

Для симетричного розташування паралельних гілок ОЯ в магнітному полі необхідне виконання умов  $\frac{Z}{a} = \text{ц. ч.}$  і  $\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.}$

#### 4.1. Петльові обмотки якоря

Укладемо верхню сторону першої секції завширшки  $y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \xi$  й приєдна-

ємо її до першої колекторної пластини (рис. 4.1). Кінець секції підключимо до колекторної пластини, розташованої на відстані  $y_K = m$ , де  $m = 1, 2, 3, \dots$  – число ходів обмотки. Верхню сторону другої секції розмістимо в пазу, який відстоїть від першого паза на величину кроку  $y = m$ .

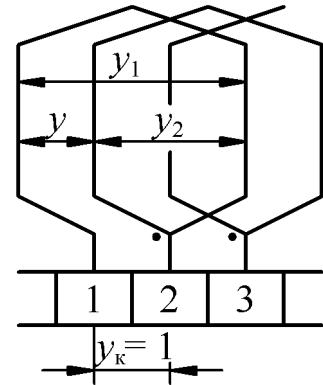


Рис. 4.1. Утворення ПО при  $m = 1$

##### 4.1.1. Прості петльові обмотки

При складанні схеми ОЯ використовують поняття кроків обмотки (рис. 4.1):  $y_1$  – перший частковий крок (ширина секції);  $y_2$  – другий частковий крок;  $y$  – результуючий крок;  $y_K$  – крок по колектору;

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \xi, \quad (4.1)$$

де  $\xi$  – укорочення кроку ОЯ.

$$y = y_K = 1; \quad y = y_1 + y_2; \quad y_2 = y - y_1.$$

Особливістю простої ПО є те, що результуючий крок  $y = 1$ , тобто сторони секцій лежать у сусідніх пазах і крок по колектору  $y_K = 1$ , а сторони кожної секції ОЯ підключаються до сусідніх колекторних пластин.

**Приклад.** Дані простої петльової обмотки:

$$Z_e = 12; \quad 2p = 4; \quad \tau = \frac{12}{4} = 3; \quad y_1 = \frac{12}{4} \pm \xi = 3; \quad y = y_k = 1; \quad y_2 = -2;$$

$$b_p = \alpha_\delta \cdot \tau \approx 2; \quad \alpha = \frac{360}{Z_e} \cdot p = \frac{360}{12} \cdot 2 = 30 \text{ ел. град.}$$

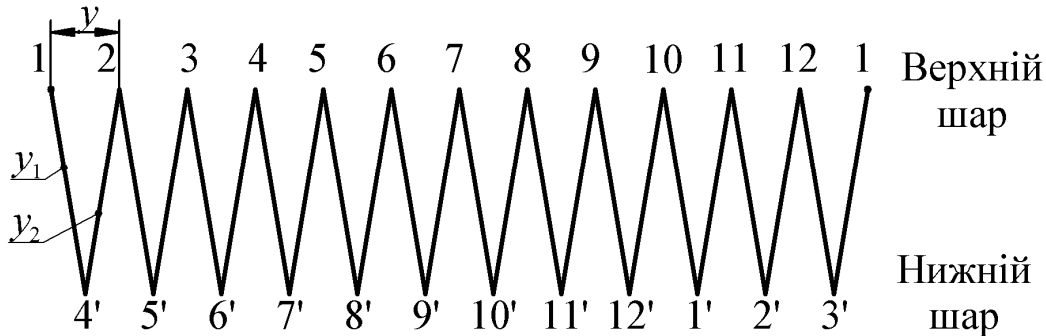


Рис. 4.2. Таблиця кроків простої ПО

З урахуванням значень кроків обмотки ( $y_1, y_2, y$ ) побудуємо таблицю кроків (рис. 4.2). Після обходу всіх пазів якоря одержимо замкнену обмотку. За схемою кроків можна побудувати схему-розгортку простої ПО (рис. 4.3). Ширина полюсної дуги ( $b_p$ ) дорівнює 2 пазовим діленням, тому контури полюсів на рис. 4.3 зображені з відступом від границь полюсних розподілів на 0,5 пазового ділення.

Лінія на поверхні якоря, яка проходить посередині між двома полюсами, називається **лінією геометричної нейтралі** й характеризується тим, що уздовж цієї лінії індукція поля збудження дорівнює нулю.

При обертанні якоря частина секцій замикається щіткою. Необхідно, щоб при замиканні секцій щіткою в них наводилася мінімально можлива ЕРС. Ця умова виконується для секцій, провідники яких розміщені на лініях геометричної нейтралі (або поблизу їх), тобто в даному прикладі для першої секції. Тому першу щітку розміщують так, щоб вона примикала до першої колекторної пластини (рис. 4.3).

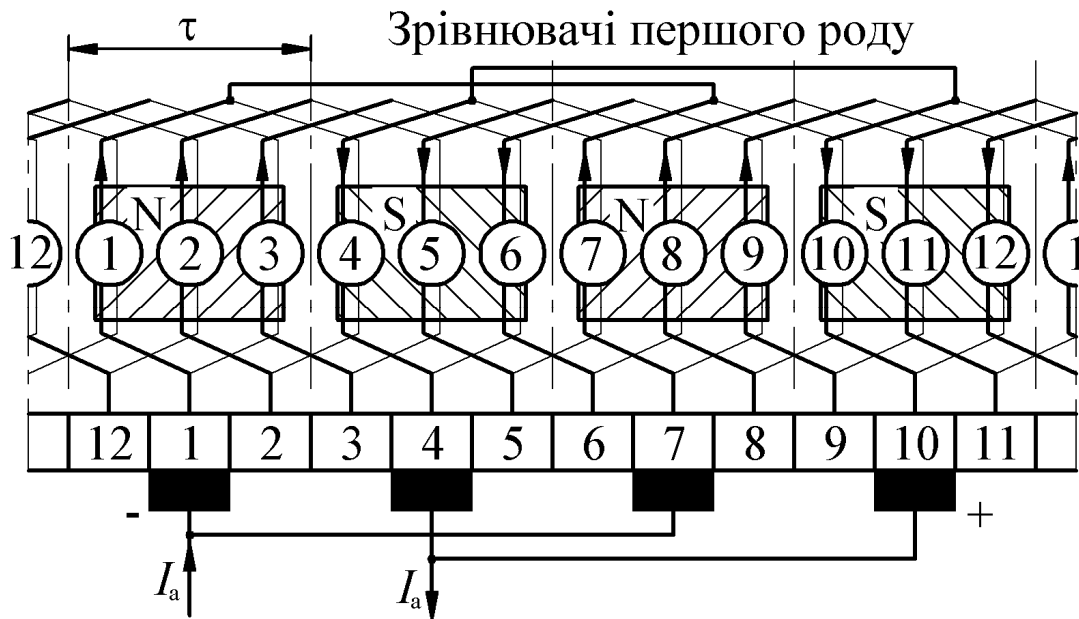
Крок щіток по колектору

$$y_{щ} = K/2p. \quad (4.2)$$

У даному прикладі  $y_{щ} = 12/4 = 3$ , таким чином, друга щітка повинна примикати до 4-ї колекторної пластини, третя – до 7-ї, а четверта – до 10-ї колекторної пластини.

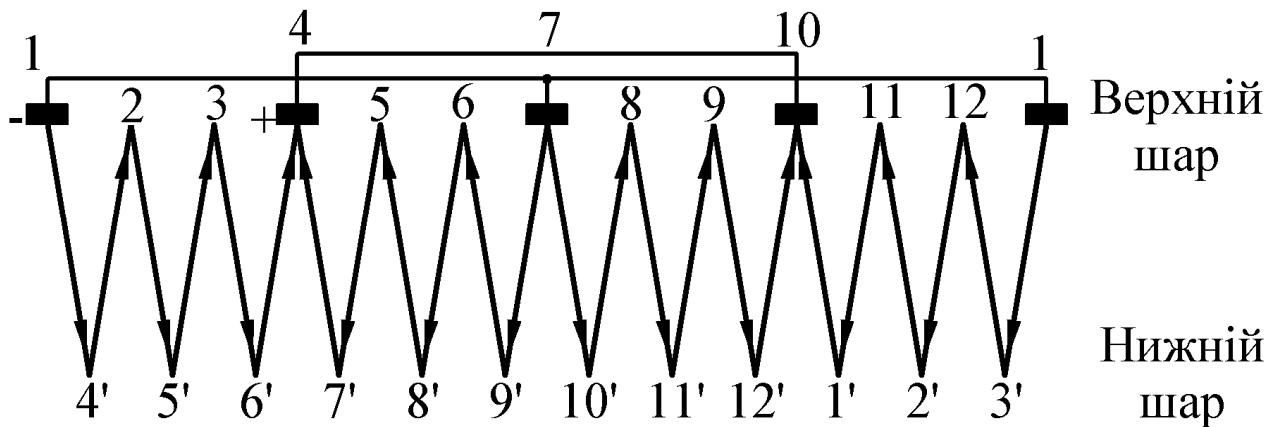
Крок щіток однієї полярності дорівнює  $K/p$  (у даному прикладі 6), тобто щітки, які примикають до 1-ї та 7-ї пластин, мають негативну полярність, а щітки, які примикають до 4-ї та 10-ї пластин, – позитивну.

Щітки однієї полярності з'єднуються паралельно.



*Рис. 4.3. Схема-розгортка простої ПО*

З побудованої схеми видно, що у ПО напрямок струму в секціях, що лежать під різними полюсами, теж різний. Провідники верхнього шару приєднуються до однойменних колекторних пластин. На таблиці кроків (рис. 4.2) можна проставити щітки (рис. 4.4).



*Рис. 4.4. Утворення паралельних гілок простої ПО*

На рис. 4.3, 4.4 існує чотири групи секцій з різним напрямком струму й числом полюсів обмотки, рівним чотирьом. У замкненій обмотці такі секції можна з'єднати тільки паралельно. Таким чином, для простої ПО  $2a = 2p$ .

При обертанні якоря секції ОЯ переходять з однієї паралельної гілки в іншу, при цьому змінюється напрямок струму в цих секціях (рис. 4.5,а).

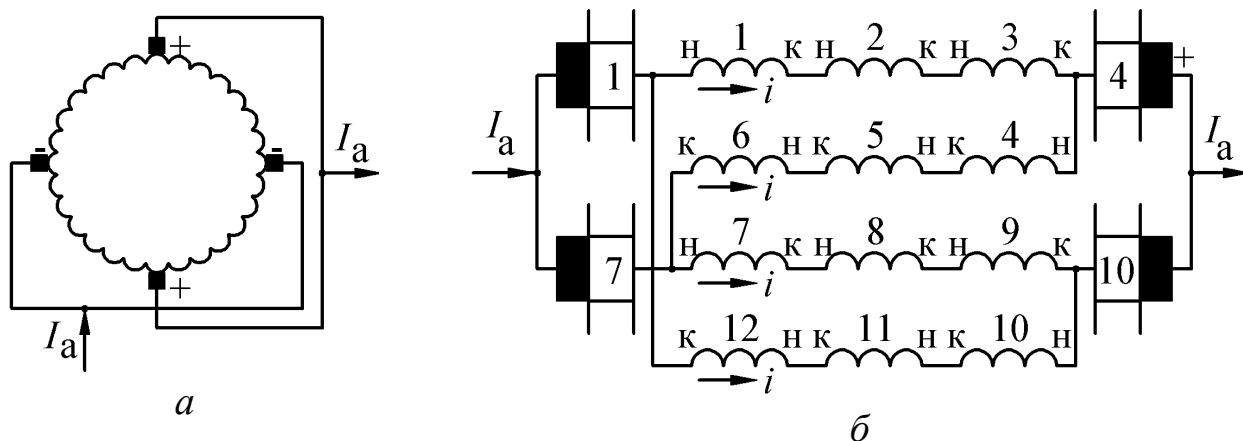


Рис. 4.5. Схема паралельних гілок простої ПО

Для визначення правильності розташування щіток, тобто для визначення кількості секцій у кожній паралельній гілці, будують схему з'єднання паралельних гілок обмотки (рис. 4.5,б) на підставі схеми розгорнення обмотки (рис. 4.3, 4.4). Для даного моменту часу в паралельні гілки входять секції: **перша гілка** – 1, 2, 3; **друга гілка** – 4, 5, 6; **третья гілка** – 7, 8, 9; **четверта гілка** – 10, 11, 12.

Зірку пазових ЕРС (рис. 4.6) побудуємо з урахуванням кута зсуву векторів ЕРС сусідніх пазів  $\alpha = 360 \cdot 2/12 = 60$  ел. град. та врахуємо, що максимальна ЕРС у цей момент часу наводиться в провіднику, який лежить у другому пазу.

Користуючись зіркою ЕРС (рис. 4.6), можна побудувати полігон ЕРС (рис. 4.7). Будемо розташовувати вектори ЕРС секцій у тій послідовності, у якій вони з'єднані на схемі розгорнення (рис. 4.3) і на схемі паралельних гілок (рис. 4.5). Збіг кінців багатогранників свідчить про наявність точок з рівним потенціалом, якими є колекторні пластини 1-7, 2-8, 3-9, 4-10, 5-11, 6-12, що відстоять одна від одної на  $y_{\Pi} = K/p$  колекторних пластин.

Величина  $y_{\Pi}$  називається потенційним кроком. Відзначені точки мають теоретично рівні потенціали. У дійсності через нерівномірність повітряного зазору, неоднорідності матеріалу якоря, асиметрії магнітної системи й ін. потоки окремих полюсів виявляються неоднаковими.

При цьому в паралельних гілках протікають значні зрівнювальні струми. Вони замикаються по паралельних проводах щіток (рис. 4.5,а), тому це приводить до незадовільної роботи щіткового апарата.

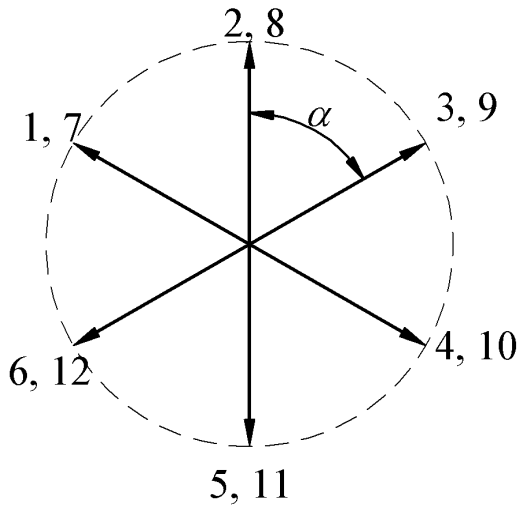


Рис. 4.6. Діаграма ЕРС

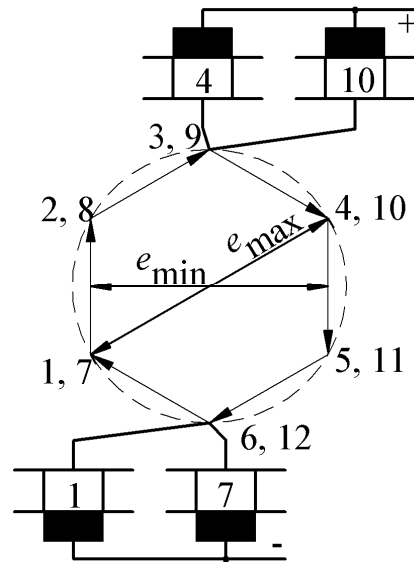


Рис. 4.7. Полігон ЕРС

Для того щоб розвантажити щітки від зрівнювальних струмів, необхідно з'єднати точки ОЯ з рівним потенціалом перемичкою або з боку колектора, або з боку лобових частин (рис. 4.3). Такі з'єднання називають **зрівнювачами першого роду**. Крок зрівнювача

$$y_{зр} = y_{п} = K/p. \quad (4.3)$$

Оскільки опір зрівнювальних проводів менший від опору щіткового контакту, то зрівнювальні струми замикаються по зрівнювачах. Як правило, зрівнювачі ставлять через (1–2) колекторні пластини. Переріз проводу зрівнювача становить (1/4 ÷ 1/3) перерізу проводу ОЯ. Іноді ставлять один зрівнювач на полюс. Замкнений багатогранник ЕРС (рис. 4.7) свідчить про симетрію ОЯ, при цьому кожній парі паралельних гілок відповідає один полігон.

При обертанні якоря ЕРС на щітках змінюється від  $e_{\min}$  до  $e_{\max}$  (рис. 4.8).

Пульсацію ЕРС розраховують за формулою

$$\Delta e = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\text{сер}}} \cdot 100 \%, \quad (4.4)$$

де  $e_{\text{сер}}$  – за рис. 4.8.

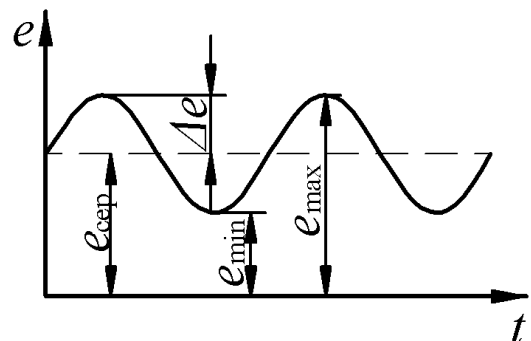


Рис. 4.8. Зміна ЕРС

Чим більше  $K/2p$ , тим менші пульсації, тому при проектуванні МПС бажано вибрати  $K/2p \geq 14 \div 20$ .

#### 4.1.2. Складні петльові обмотки

За необхідності одержати петльову обмотку з більшим числом паралельних гілок (наприклад у низьковольтних машинах) застосовують складну ПО. Такі обмотки являють собою декілька ( $m = 2, 3, \dots$ ) простих ПО, приєднаних до одного колектора. Секції « $m$ » простих обмоток чергуються уздовж розточки якоря, а прості ПО включаються паралельно. Кількість паралельних гілок **складної  $m$ -ходової** обмотки

$$2a = 2p \cdot m. \quad (4.5)$$

Результуючий крок по елементарних пазах

$$y = y_K = m. \quad (4.6)$$

Ширина щітки при складній ПО приймається такою, щоб кожна щітка перекривала « $m$ » колекторних пластин, при цьому прості ПО з'єднуються паралельно. Найпоширеніші двоходові ( $m=2$ ) складні ПО. Складна ПО може бути **однократно замкненою** або **двократно замкненою**, тобто являє собою дві окремі замкнені прості ПО, що з'єднуються в паралельні гілки за допомогою щіток. Кратність замикань « $t$ » дорівнює найбільшому дільнику чисел « $m$ » і « $K$ ». Для двоходових ( $m = 2$ ) обмоток при « $K$ », **рівному непарному числу, виходить однократно замкнена ПО, а при « $K$ », рівному парному числу, двократно замкнена, для якої існують більш тяжкі умови комутації.**

**Приклад.** Дані складної ПО :  $Z_e = 21$ ;  $2p = 6$ ;  $m = 2$ .

Кроки обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \xi = \frac{21}{6} \pm \xi = 3\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 3; \quad y = 2; \quad y_2 = -1.$$

Побудована таблиця кроків (рис. 4.9) показує, що після двох обходів якоря отримана **однократно замкнена** складна ПО.



Рис. 4.9. Таблиця кроків однократно замкненої складної ПО

**Приклад.** Дані складної ПО:  $Z_e = 20$ ;  $2p = 4$ ;  $m = 2$ .

Кроки обмотки:

Перший частковий шаг ( $y_1$ ) робимо подовженим

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \xi = \frac{20}{4} \pm \xi = 5 + 1 = 6; y = 2; y_2 = -4; \alpha = 36 \text{ ел. град.}$$

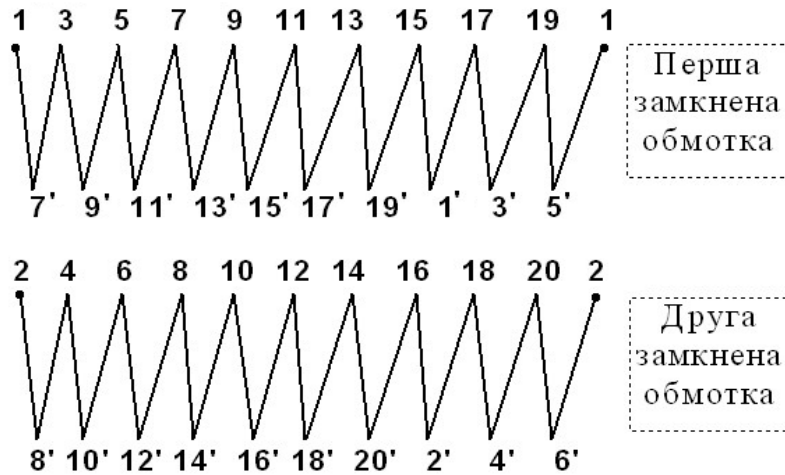


Рис. 4.10. Таблиця кроків двократно замкненої ПО

У розглянутому випадку таблиця кроків (рис. 4.10) показує, що отримано дві самостійні ПО. Складна ПО якорі утворюється з  $m = 2$  простих ПО, з'єднаних щітками паралельно.

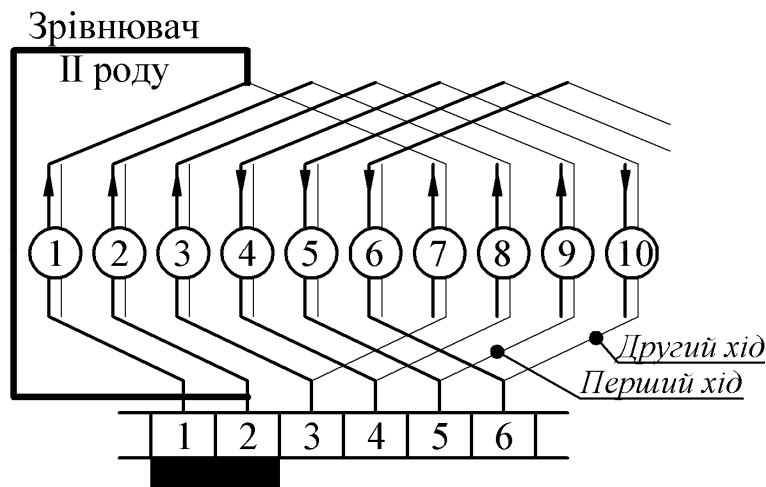


Рис. 4.11. Виконання зрівнювачів II роду

Забезпечити однаковий контакт з усіма простими обмотками практично неможливо, тому струм між простими обмотками розподіляється неоднаково, що обумовлює нерівномірний розподіл потенціалу по колектору. Для усунення цього небажаного явища застосовують зрівнювачі II роду, за допомогою яких прості обмотки з'єднують між собою в точках теоретично рівного потенціалу (рис. 4.11).

Таким чином, якщо зрівнювачі I роду усувають наслідки магнітної асиметрії, то зрівнювачі II роду усувають нерівномірність розподілу потенціалу по колектору.

На рис. 4.12 побудовані векторна діаграма ЕРС секційних сторін і полігон ЕРС, по яких визначають місця приєднання зрівнювачів (точки теоретично рівного потенціалу).

Тип зрівнювача II роду залежить від відношення  $Z_e / p$ .

Якщо  $Z_e / p =$  парному числу, то зрівнювачі з'єднують точки, розташовані на протилежних сторонах якоря (рис. 4.11), тобто середину першої секції з'єднують з другою колекторною пластиною, до якої підключена друга проста хвильова обмотка. Такий зрівнювач потрібно протягати крізь спеціальні отвори між якорем і валом або крізь вентиляційні канали.

Якщо  $Z_e / p$  дорівнює непарному числу, то зрівнювачі I роду виконують функції зрівнювачів II роду.

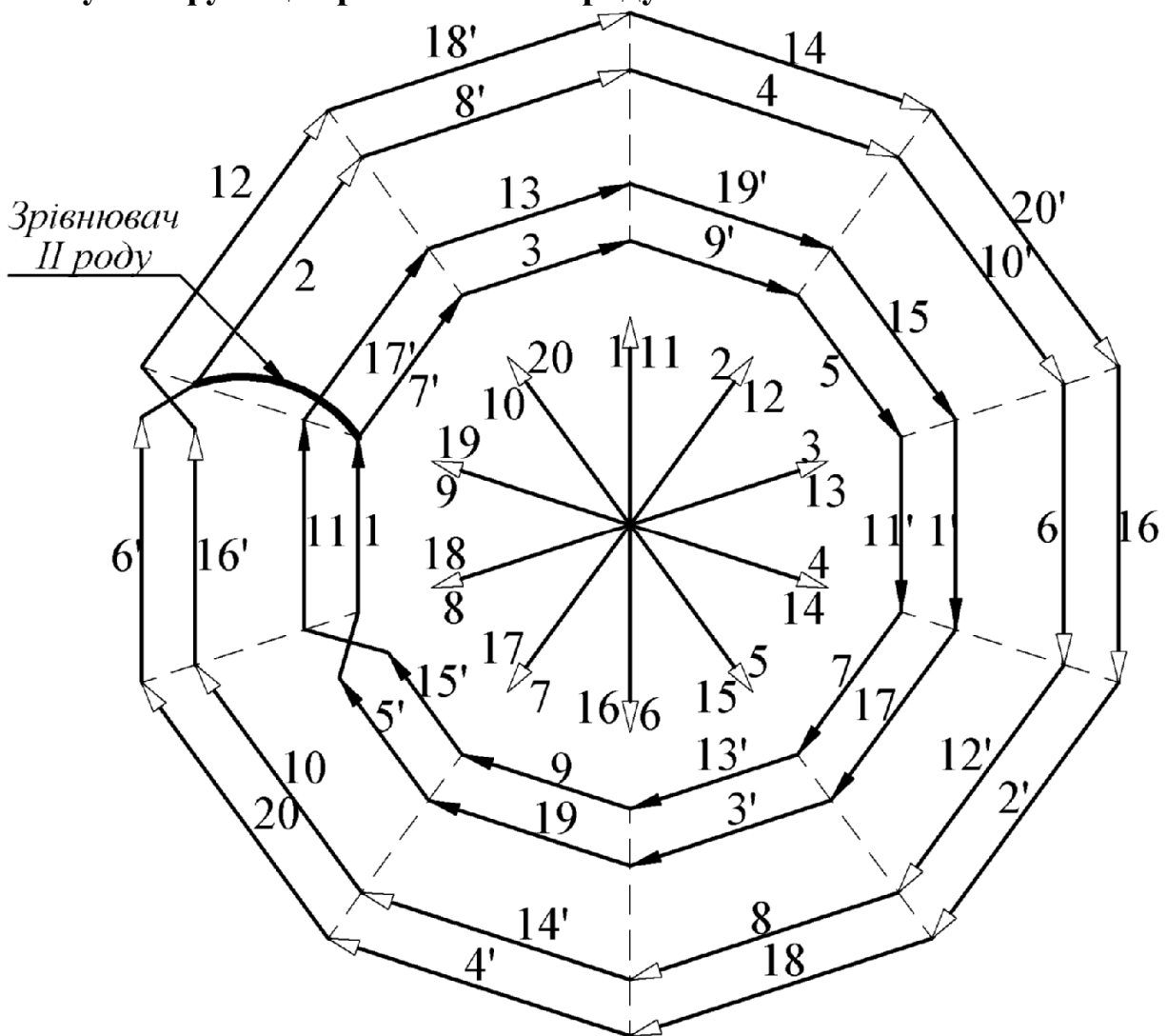


Рис. 4.12. Полігон ЕРС двократно замкненої ПО

## 4.2. Хвильові обмотки якоря



Укладемо верхню сторону першої секції за-  
вширшки  $y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \xi$  й  
приєднаємо її до першої  
колекторної пластини  
(рис. 4.13).

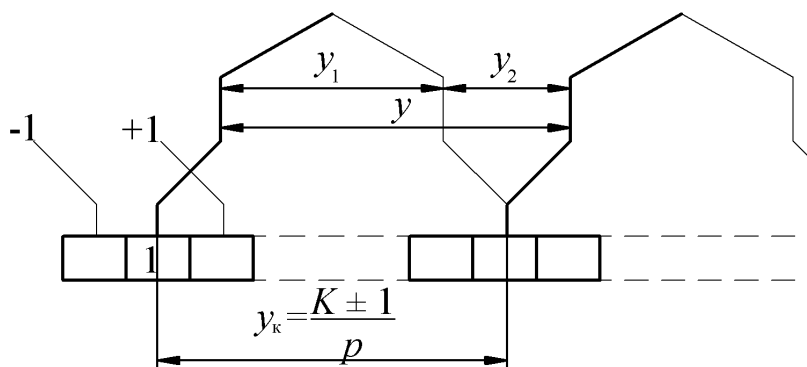


Рис. 4.13. Утворення ХО

Кінець секції підім-  
кнемо до колекторної  
пластини, розташованої  
на відстані

$$y_k = y_1.$$

Верхню сторону другої секції розмістимо в пазу, який відстоїть від першого паза на величину кроку

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \text{ц. ч.} \quad (4.7)$$

Оскільки перший крок  $y_1 \approx \tau$ , то, обійшовши все розточення статора, послідовно з'єднаємо « $p$ » секцій.

При цьому у формулі (4.7) знак «-» відповідає **лівоходовій (неперехресній)** обмотці, знак «+» – **правоходовій (перехресній)**. При лівоходовій обмотці після обходу якоря секція приєднується до колекторної пластини, яка знаходиться ліворуч від вихідної. Правоходові обмотки не одержали практичного застосування.

#### 4.2.1. Симетрична проста хвильова обмотка

Розглянемо обмотку з такими даними:

$$Z_e = 15; 2p = 4; S = K = 15.$$

Кроки обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} - \xi = \frac{15}{4} - \xi = 3\frac{3}{4} - \frac{3}{4} = 3; y = y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{15-1}{2} = 7,$$

$$y_2 = y - y_1 = 4; \tau = \frac{Z_e}{2p} = \frac{15}{4} = 3\frac{3}{4}; y_{\text{щ}} = \tau = 3\frac{3}{4}.$$

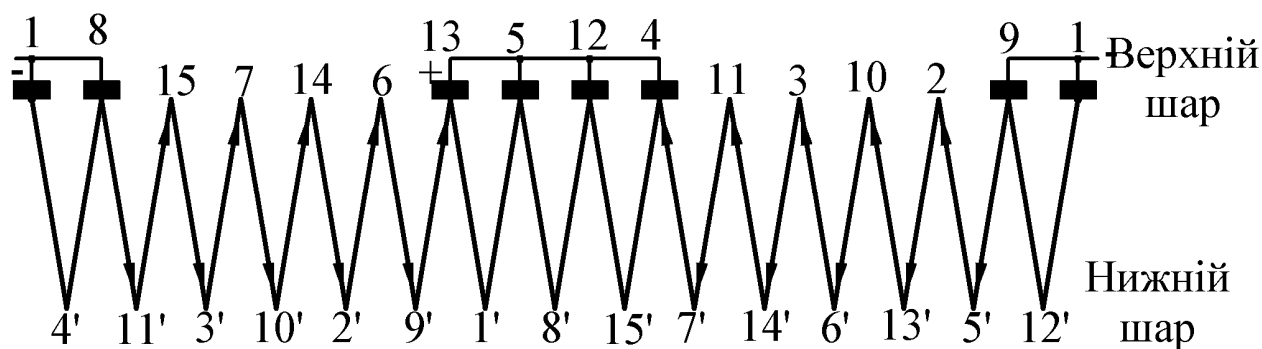


Рис. 4.14. Таблиця кроків простої ХО

Використовуючи таблицю кроків, (рис. 4.14) побудуємо схему розгортку обмотки (рис. 4.15).

Після першого обходу перемістимося ліворуч (рис. 4.15) на одну зубцеву поділку і при цьому з'єднаємо послідовно секції, які розташовані під однойменними полюсами.

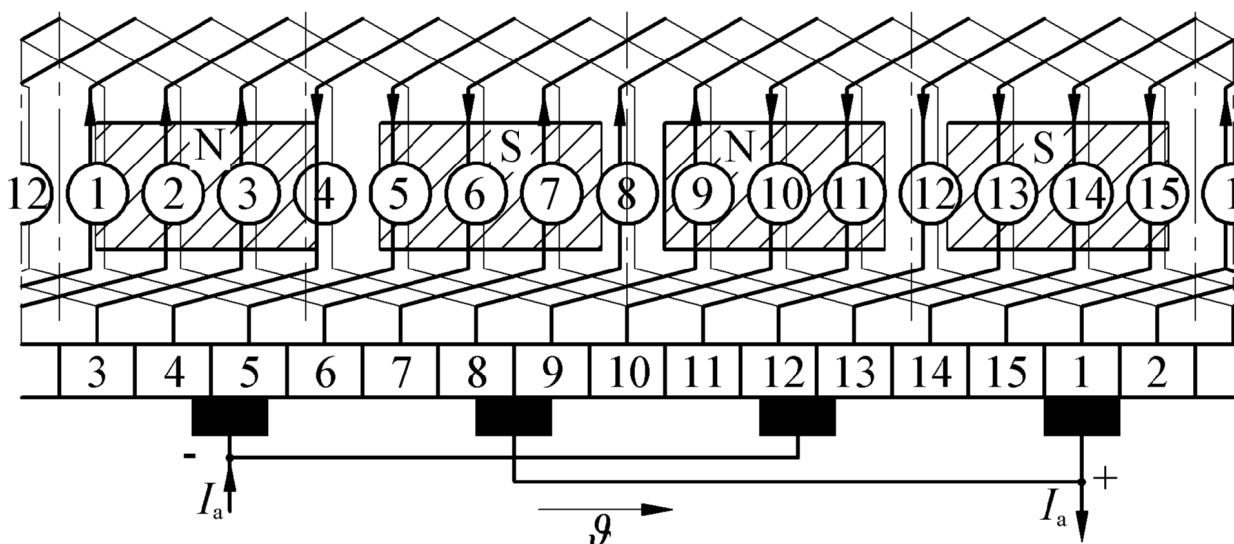


Рис. 4.15. Схема-розгортка простої ХО

#### 4.2.2. Несиметричні хвильові обмотки

Таким чином, є дві частини ОЯ із зустрічним напрямком ЕРС. Ці частини ОЯ утворюють паралельні гілки (рис. 4.15). Проста ХО має число паралельних гілок  $2a = 2$ . Кожна паралельна гілка проходить під усіма полюсами, магнітна асиметрія не викликає нерівності ЕРС, відпадає необхідність у зрівнювальних з'єднаннях. Крім того, потенційний крок  $y_{\text{п}} = K / p = \text{ц.ч.}$ , тобто обмотка не має точок з однаковим потенціалом. Для простої ХО досить установити дві щітки. Оскільки для результуючого

кроку повинне виконуватися співвідношення  $y = \frac{Z_e - 1}{p} = \text{ц.ч.}$ , то для

одержання симетричної ХО при парному « $p$ » необхідно, щоб число елементарних пазів ( $Z_e$ ) було непарним.

При парному значенні чисел « $p$ » та « $Z_e$ » можна виконати ХО з числом колекторних пластин  $K = Z_e - 1$ .

Кінці однієї секції не приєднуються до колекторних пластин. Така обмотка називається ХО з *мертвою секцією*.

**Приклад.**  $Z_e = 16; 2p = 4; K = 15; 2a = 2,$

$$\tau = \frac{16}{4}; y_1 = \frac{16}{4} \pm \xi = 4; y = \frac{K+1}{p} = 8; y_2 = 4.$$

Складемо таблицю кроків (рис. 4.16) для секції завширшки 4 п. д. так, що верхня сторона її розміститься в 16-му пазі, а нижня – в 4-му, і залишимо її не підключеною до колектора.

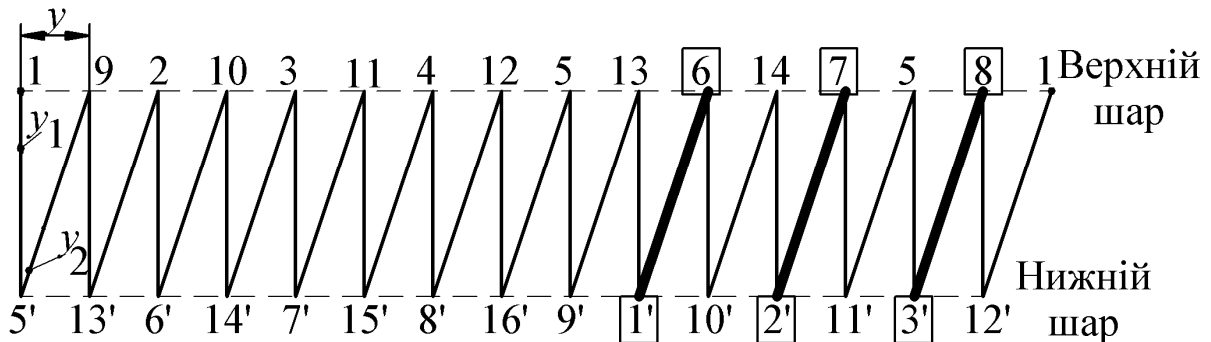


Рис. 4.16. Таблиця кроків ХО з мертвою секцією

Тоді при складанні таблиці кроків у схемі буде 15 активних сторін у верхньому шарі обмотки. При виконанні схеми частина секцій виконується з кроком  $y_2 = 5$  (1-6, 2-7, 3-8 на рис. 4.16).

При *парному*  $Z_e$  і *парному* значенні  $K$  можна виконати *штучно замкнену хвильову обмотку*.

**Приклад.**  $Z_e = S = K = 16; 2p = 4; 2a = 2.$

При розрахунках кроків умовно вважаємо, що  $Z_e = K = 17$ , тоді

$$y_1 = 17/4 - 1/4 = 4; y = y_K = (17-1)/2 = 8; y_2 = 4.$$

Після першого обходу (рис. 4.17) кінець 9 секції повинен бути підключений до 17-ї колекторної пластини. Але оскільки її немає, то з'єднаємо перемичкою нижню сторону секції, розташовану в 13-му пазу, з 8-ю колекторною пластиною (8 – початок секції).

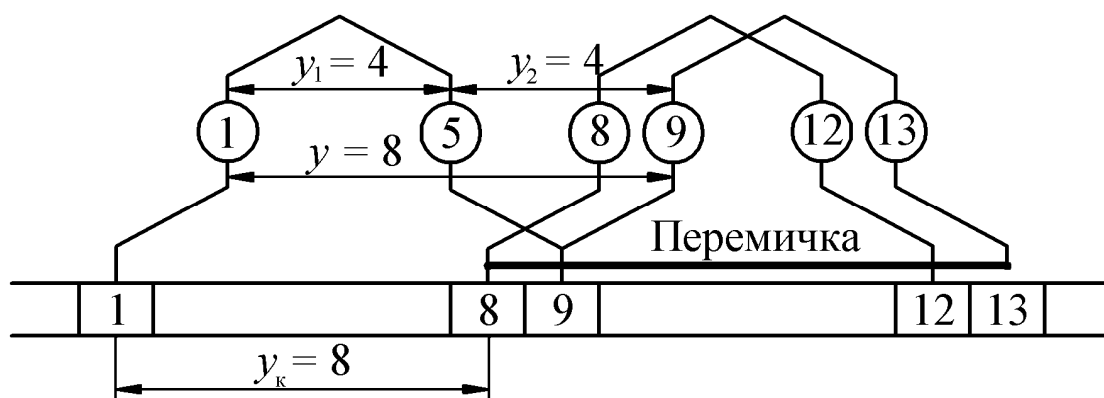


Рис. 4.17. Штучно замкнена секція

Після цього будемо виконувати обмотку звичайним чином за умови, що для кожної другої секції результуючий крок необхідно зменшити на одиницю, тобто  $y = 7$  ( $y_2 = 3$ ). На рис. 4.18 показана схема кроків такої обмотки, де стрілкою відзначений результуючий крок  $y = 7$ .

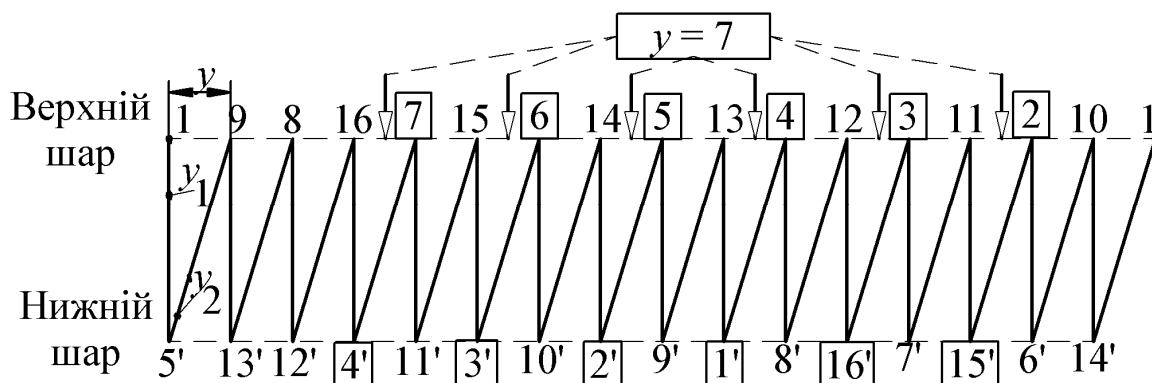


Рис. 4.18. Таблиця кроків штучно замкненої ХО

### 4.2.3. Складні хвильові обмотки

Складну ХО можна розглядати як об'єднання « $m$ » простих хвильових обмоток, які включаються паралельно за допомогою щіток. Число паралельних гілок  $2a = 2m$ . Виконання симетричної багатоходової обмотки можливо за умови  $\frac{2p}{m} = \text{ц. ч.}$  Найбільше число ходів обмотки  $m_{\max} = 2p$ ,

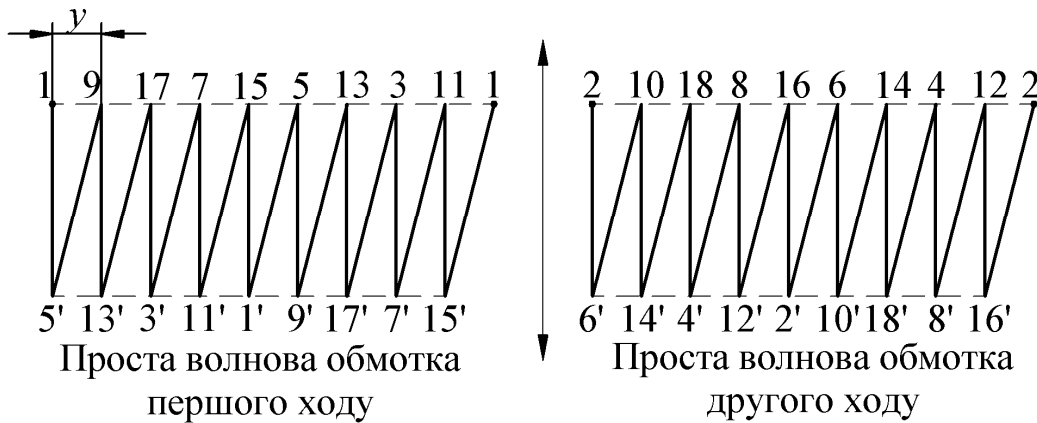
число паралельних гілок  $2a_{\max} = 4p$ . Перший крок  $y_1 = \frac{Z_e}{2p} \mp \xi$ , результуючий крок ( $y = y_1 + y_2$ ) складної хвильової обмотки

$$y = y_k = \frac{Z_e \mp m}{p} = \frac{Z_e \mp a}{p}. \quad (4.8)$$

**Приклад.**  $Z_e = S = K = 18; 2p = 4; m = 2; a = 2,$

$$y_1 = \frac{18}{4} \mp \xi = \frac{18}{4} - \frac{1}{2} = 4; y = \frac{18-2}{2} = 8; y_2 = 4; \tau = \frac{18}{4}.$$

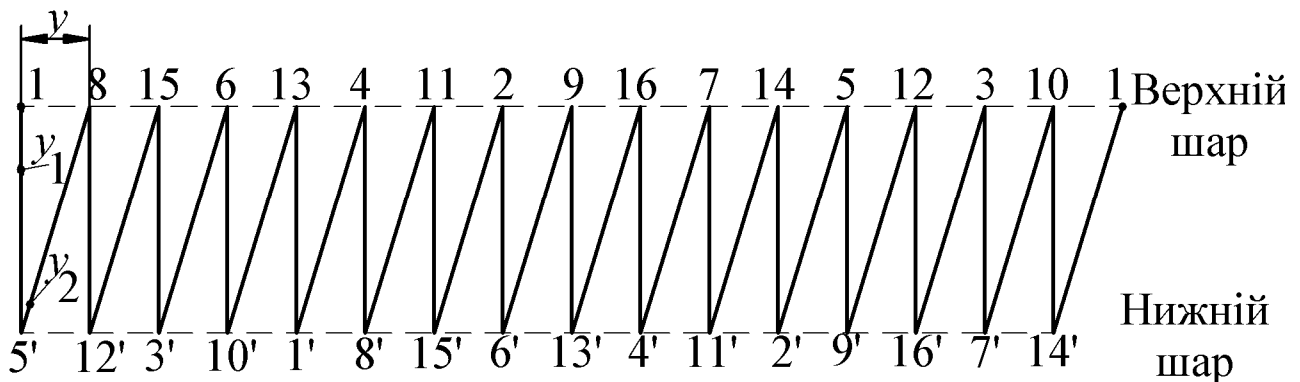
Таблиці кроків простої хвильової обмотки першого й другого ходів, зображені на рис. 4.19, показують: **якщо  $Z_e$  й  $2p$  не є взаємно простими числами, то хвильова обмотка – дворазово замкнена двоходова.**



*Рис. 4.19. Таблиця кроків двократно замкненої двоходової ХО*

**Приклад.**  $Z_e = S = K = 16; 2p = 4; m = 2 (a = 2).$

$$y_1 = 16/4 = 4; y = (16-2)/2 = 7; \tau = 4; \alpha = 45 \text{ ел.град.}$$



*Рис. 4.20. Таблиця кроків однократно замкненої двоходової ХО*

За схемою кроків (рис. 4.20) можна побудувати однократно замкнену двоходову складну хвильову обмотку. У складних ХО застосовують зрівнювачі II роду. Тип зрівнювача залежить від відношення  $p/m$ . Якщо  $p/m$  дорівнює цілому числу, то зрівнювачі розташовують або з боку колектора, або з боку лобових частин. Якщо  $p/m$  не дорівнює цілому числу, то зрівнювачами з'єднують точки теоретично рівного потенціалу на протилежних сторонах якоря. Точки з рівними потенціалами визначаються за полігоном ЕРС (рис. 4.21)

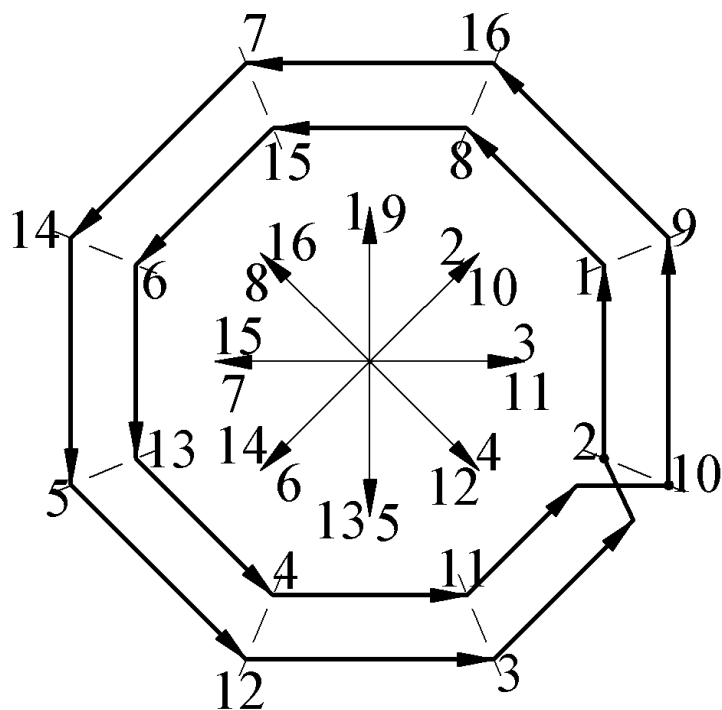


Рис. 4.21. Полігон ЕРС однократно замкненої двоходової складної хвильової обмотки

### 4.3. Комбіновані обмотки

Комбінована обмотка якоря є комбінацією петльової та хвильової обмоток, розташованих в одних пазах і приєднаних до одного колектора (рис. 4.22), тобто в пазу розміщені чотири шари провідників, а до кожної колекторної пластини припаєні чотири провідники. Перевага комбінованої обмотки – велика кількість паралельних гілок. Ця обмотка може бути виконана лише за умови рівності чисел паралельних гілок у хвильовій і петльовій обмотках. Для ПО  $2a = 2p$ , а для ХО  $2a = 2m$ , тому хвильова обмотка виконується з числом ходів  $m = p$ .

Число паралельних гілок комбінованої обмотки

$$2a = 2a_{\text{П}} + 2a_{\text{В}} = 4a_{\text{П}}. \quad (4.9)$$

У комбінованій ОЯ одна обмотка відносно до іншої є зрівнювачем. Таким чином, відпадає необхідність у зовнішніх зрівнювальних з'єднаннях.

Комбіновані ОЯ застосовуються у машинах великої потужності, у машинах зі змінним навантаженням, у швидкісних машинах, у яких ускладнено виконання зрівнювачів. Секції рівносекційної обмотки показано на рис. 4.23, переріз – на рис. 4.22.

Кроки комбінованої обмотки

$$y_{1\text{П}} + y_{1\text{В}} = 2\tau; \quad y_{\text{кП}} + y_{\text{кВ}} = K / p; \quad |y_{2\text{П}}| = |y_{2\text{В}}|. \quad (4.10)$$

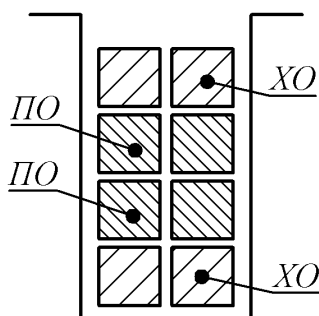


Рис. 4.22. Комбінована ОЯ

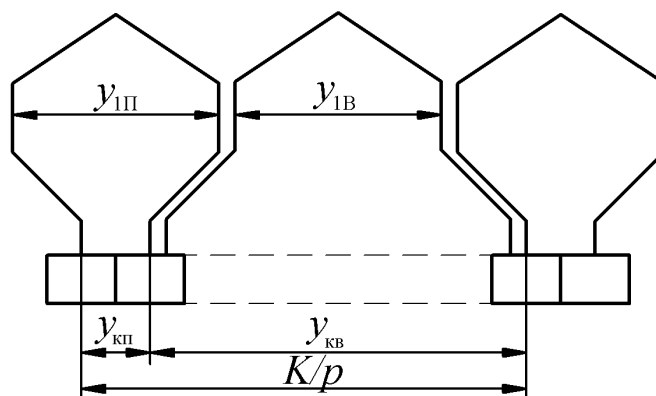


Рис. 4.23. Секції комбінованої ОЯ

Ця обмотка має досить високий коефіцієнт заповнення паза. Недолік – наявність великої кількості пайок у лобових частинах обмотки. Число паралельних гілок обмоток однакове, по кожній обмотці протікає половина струму, тобто кожна обмотка розраховується на половину потужності МПС.

#### 4.4. Аналіз властивостей обмотки якоря

Заміняючи дійсний розподіл  $B_{\delta}(x)$  трапецеїдальним, вираз для першої гармоніки індукції має вигляд

$$B_{\delta 1}(x) = \frac{4B_{\delta 0}}{\pi^2(1-\alpha_{\delta})} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2}(1-\alpha_{\delta})\right) \cdot \sin x + \frac{1}{9} \sin 3\left(\frac{\pi}{2}(1-\alpha_{\delta})\right) \cdot \sin 3x + \dots \right]$$

Враховуючи тільки перший член у розкладанні Фур'є, дістанемо для частково розбіжного зазору

$$B_{\delta 1m} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{B_{\delta 0}}{(1-\alpha'_{\delta})} \cdot \left( \sin \frac{\pi}{2} (1-\alpha'_{\delta}) \right) \quad (4.11)$$

і для рівномірного зазору

$$B_{\delta 1m} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{B_{\delta 0}}{(1-\alpha_{\delta})} \sin \left[ \frac{\pi}{2} (1-\alpha_{\delta}) \right]. \quad (4.12)$$

Середнє значення індукції

$$B_{\delta \text{сер}} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1m}. \quad (4.13)$$

Коефіцієнт скорочення обмотки

$$\kappa_y = \sin \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_1}{\tau} \right), \quad (4.14)$$

де  $y_1$  – перший частковий крок обмотки (ширина секції).

ЕРС секції ОЯ

$$E_c = 2\pi \cdot f \cdot w_c \cdot k_y \cdot \Phi_{1m} = 2\pi \cdot f \cdot w_c \cdot k_y \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot B_{\delta\text{сер}}. \quad (4.15)$$

Частота ЕРС

$$f = \frac{p \cdot n_H}{60}. \quad (4.16)$$

Максимальна ЕРС на щітках визначається як геометрична сума ЕРС секцій, що входять у паралельну гілку

$$E_{1\text{max}} = \frac{S}{2a} \cdot \kappa_p \cdot E_c. \quad (4.17)$$

Зменшення ЕРС паралельної гілки, обумовлене укороченням кроку ОЯ,

$$\Delta E = E_a - E_{1\text{max}}, \quad (4.18)$$

де  $E_a$  – ЕРС якоря за електромагнітним розрахунком

Коефіцієнт розподілу обмотки ( $\kappa_p$ )

$$\kappa_p = \frac{\sum_{\text{геом}} E_c}{\sum_{\text{арифм}} E_c} \approx \frac{2R_e}{\pi \cdot R_e} \approx \frac{2}{\pi}, \quad (4.19)$$

де  $R_e$  – радіус окружності, описаної навколо полігона ЕРС:

$2R_e$  – геометрична сума ЕРС секції однієї паралельної гілки;

$\pi \cdot R_e$  – арифметична сума ЕРС.

Пульсації ЕРС на щітках

$$\frac{E_{1\text{min}}}{E_{1\text{max}}} = \cos\left(\pi \cdot \frac{p}{K}\right), \quad (4.20)$$

де  $K$  – число колекторних пластин;

$p$  – число пар полюсів.

Відхилення напруги паралельної гілки від середнього значення

$$\Delta E_{\%} = \frac{\Delta E}{E_1} 100 = \frac{0,5(E_{1\text{max}} - E_{1\text{min}})}{0,5(E_{1\text{max}} + E_{1\text{min}})} \cdot 100 = 100 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p}{K}\right). \quad (4.21)$$

## 5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

### 5.1. Визначення головних розмірів



Розрахунок машин постійного струму слід починати з вибору висоти осі обертання  $h_0$ , нормалізованого зовнішнього діаметра якоря  $D_a$ , зовнішнього діаметра станини  $D_H$ , числа полюсів машини  $2p$  – з табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Ув'язування потужностей з висотою осі обертання двигунів виконання IP22, IC01

$h_0$ , мм	Довжина	Потужність, кВт при частоті обертання, об/хв						$D_H$ , мм	$2p$	$D_a$ , мм
		3000	2200	1500	1000	750	600			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
80	–	0.71	0.65	0.37	0.18	0.12	0.09	152	2	73
		1.1	0.75	0.65	0.25	0.18	0.12			
90	M	–	–	–	0.37	0.25	0.18	170	2	83
	L	1.5	1.1	0.75	0.55	0.37	0.25			
100	M	2.2	1.6	1.1	–	–	–	190	2	93
	L	3.0	2.2	1.5	0.75	0.65	0.37			
112	M	4.0	3.0	2.2	1.1	0.75	0.55	214	2	105
	L	5.5	4.0	3.0	1.5	1.1	0.75		4	109
132	M	7.5	6.5	4.0	2.2	1.5	1.1	252	4	130
	L	11	7.5	5.5	3.0	2.2	1.5			
160	S	15	11	7.5	4.0	3.0	2.2	308	4	160
	M	18.5	15	11	5.5	4.0	3.0			
	L	22	18.5	–	7.5	5.5	4.0			
180	M	30	22	15	–	–	–	346	4	181
	L	37	30	18.5	11	7.5	5.5			
200	M	45	37	22	15	–	–	386	4	202
	L	55	45	30	18.5	1	7.5			
225	S	–	–	–	–	15	4	436	4	230
	M	75	65	37	22	18.5	15			
	L	90	75	45	30	22	18.5			
250	M	–	90	55	37	30	20	484	4	258
	L	–	110	75	45	37	30			

Закінчення таблиці 5.1

280	M	–	132	90	55	45	–	544	4	290
	L	–	160	110	75	55	37			
315	S	–	–	132	–	–	–	612	4	330
	M	–	–	160	90	–	45			
	L	–	–	200	110	75	55			

### Розрахункова потужність

Для ДПС, кВт,  $P' = k_D \cdot P_H / \eta_H$ , (5.1)

де попереднє значення коефіцієнта  $k_D$  приймається з табл. 5.2, а коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta_H$  – з рис. 5.1.

Таблиця 5.2

Значення коефіцієнтів  $k_e$ ,  $k_D$ ,  $k_B$

Потужність, кВт	$k_e$	$k_D$	$k_B$
До 1	0,7 ... 0,8	0,65 ... 0,85	0,3 ... 0,1
1 ... 10	0,8 ... 0,9	0,82 ... 0,95	0,1 ... 0,02
10 ... 100	0,9 ... 0,96	0,85 ... 0,97	0,02 ... 0,01
100 ... 1000	0,96 ... 0,98	0,93 ... 0,98	0,01 ... 0,005

Для ДПС послідовного й незалежного збудження  $k_B = 0$ .

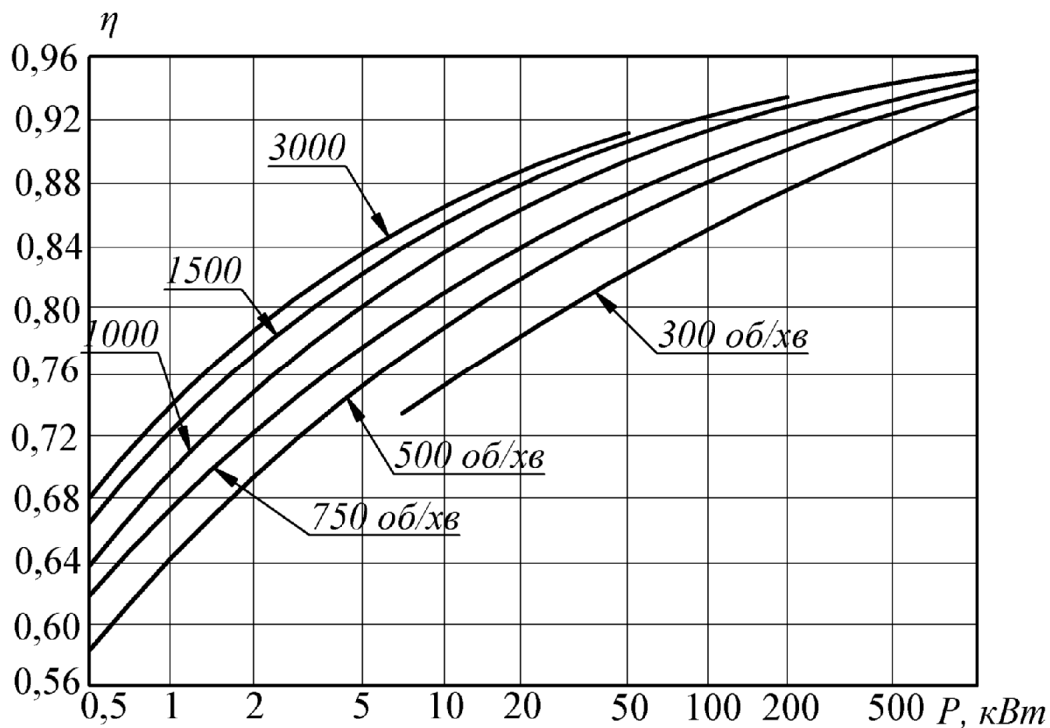


Рис. 5.1. Попереднє значення ККД

### Вибір електромагнітних навантажень

При виборі електромагнітних навантажень слід дотримуватись таких рекомендацій.

- Для МПС з помірною частотою обертання без регулювання її вище від номінальної вибирається декілька знижене значення  $B_{\delta}$  (рис. 5.2) для зменшення втрат у сталі та декілька підвищене значення лінійного навантаження якоря  $A_a$  (рис. 5.3).
- Для МПС з помірною частотою обертання й невеликим (1,25...1,5) діапазоном регулювання частоти обертання понад номінальної бажано вибрати знижене значення  $B_{\delta}$  й знижене значення лінійного навантаження якоря  $A_a$  для обмеження реактивної ЕРС  $e_r \equiv A \cdot \mathcal{G}_{\max}$ .
- Для високошвидкісних МПС з широким діапазоном регулювання частоти обертання понад номінальної вибирається підвищене значення індукції в повітряному зазорі  $B_{\delta}$  (з метою одержання стійкої роботи машини при перекиданні магнітного поля) і знижене значення лінійного навантаження якоря  $A_a$  (для обмеження ЕРС  $e_r$ ).

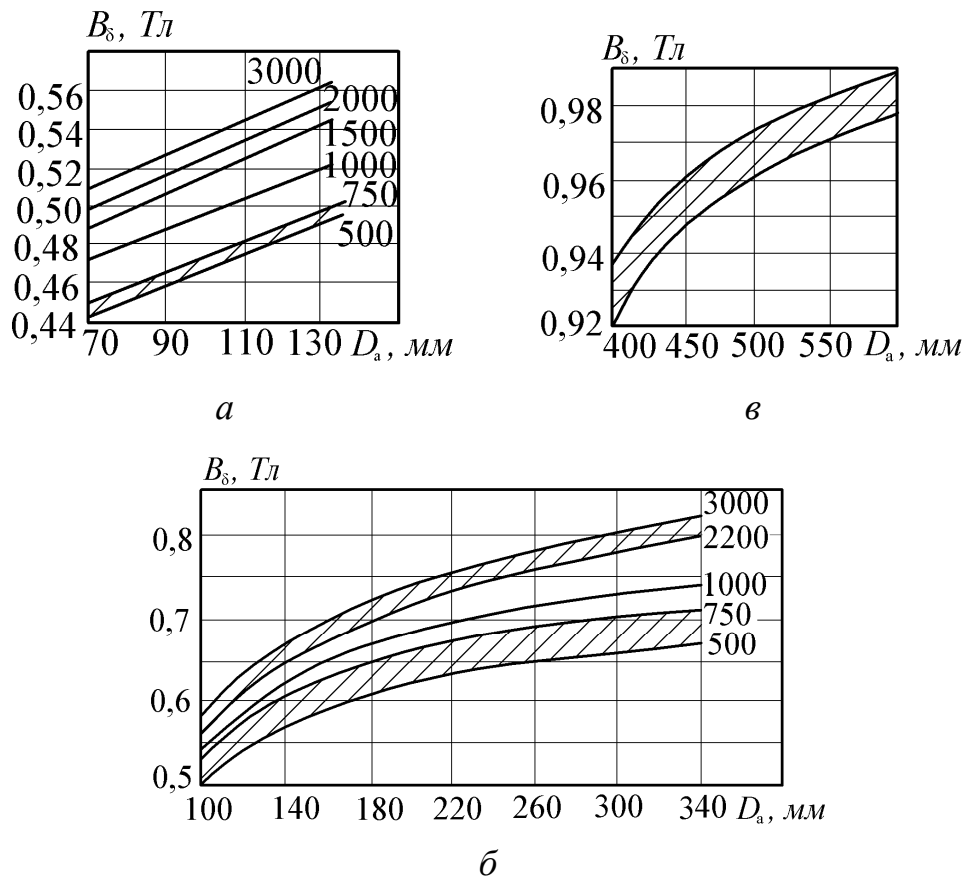


Рис. 5.2. Значення магнітної індукції у повітряному зазорі для МПС виконання IP22(23): а –  $2p = 2$ ; б, в –  $2p = 4$

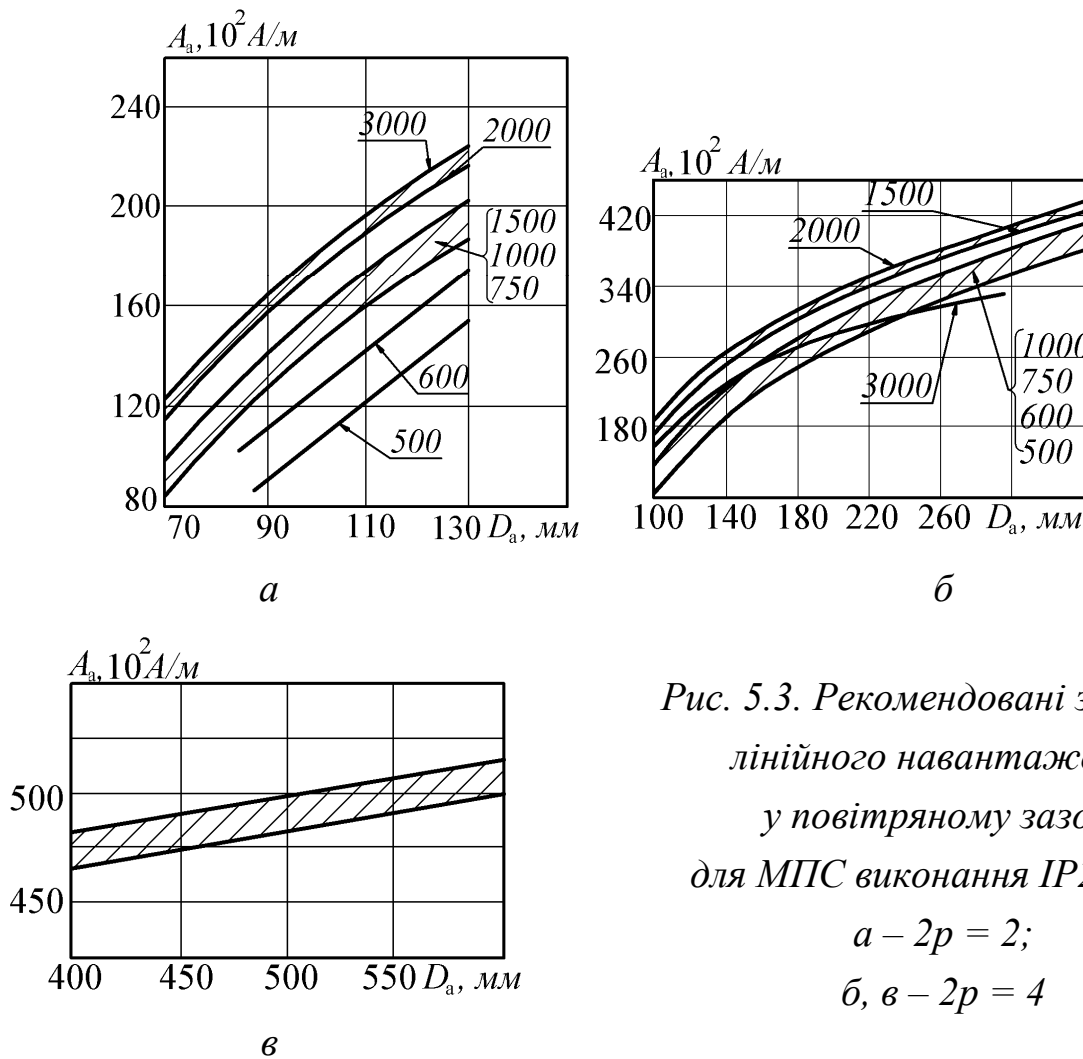


Рис. 5.3. Рекомендовані значення лінійного навантаження у повітряному зазорі для МПС виконання IP22(23):

$$a - 2p = 2;$$

$$б, в - 2p = 4$$

### Струм якоря

Струм якоря ДПС паралельного й змішаного збудження,  $A$ ,

$$I_{ан} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\eta \cdot U_H} \cdot (1 - k_B). \quad (5.2)$$

Для ДПС послідовного й незалежного збудження,  $A$ ,

$$I_{ан} = \frac{P_H}{\eta \cdot U_H} \cdot 10^3. \quad (5.3)$$

### Розрахунок довжини якоря

Довжина якоря (мм) визначається з конструктивного об'єму якоря

$$l_\delta = \frac{P' \cdot 6,1 \cdot 10^{12}}{\alpha_\delta \cdot n_H \cdot B_\delta \cdot A_a \cdot D_a^2}, \quad (5.4)$$

де  $P'$  [кВт],  $n_H$  [об/хв],  $B_\delta$  [Тл],  $A_a$  [А/м],  $D_a$  [мм].

При виборі значення розрахункового коефіцієнта полюсної дуги  $\alpha_\delta$  за рис. 5.4 слід дотримуватися таких рекомендацій:

- при збільшенні  $\alpha_\delta$  поліпшується використання конструктивного об'єму машини;
- збільшення  $\alpha_\delta$  призводить до збільшення потоків розсіяння, що несприятливо;
- при збільшенні  $\alpha_\delta$  поле основних полюсів замикається через комутаційну зону;
- у секціях, які комутуються щіткою, наводиться ЕРС реактивного характеру, що призводить до погіршення комутації;
- при збільшенні  $\alpha_\delta$  погіршуються умови розміщення обмоток головних і додаткових полюсів.

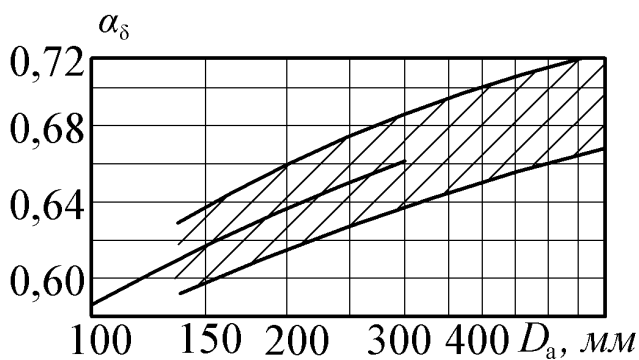


Рис. 5.4. Розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги

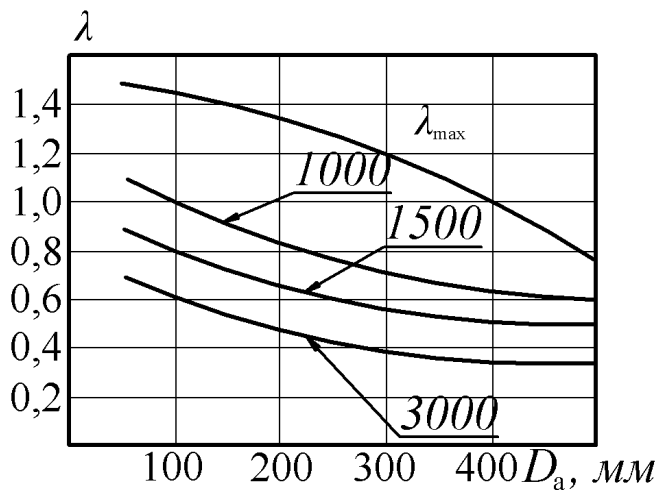


Рис. 5.5. Рекомендовані значення  $\lambda$

Правильність вибору електромагнітних навантажень і розрахунків довжини якоря визначається відношенням  $\lambda = l_\delta / D_a$  (рис. 5.5).

### До визначення $\lambda$

– Чим менше  $\lambda$ , тобто чим коротша машина, тим менша реактивна ЕРС, тому що  $e_r \equiv l_\delta$ .

– Чим менше  $\lambda$ , тим краще умови охолодження.

– Мінімум витрат має місце при  $\lambda \approx 0,8$ , мінімум витрат міді – при  $\lambda \approx 0,95$ . Більш технологічною електрична машина (ЕМ) буде при  $\lambda \approx 0,75$ , тобто бажано, щоб значення  $\lambda$  наближалось до одиниці.

– Для МПС, що працюють у реверсивних електроприводах, значення  $\lambda$  повинне наближатися до граничного значення  $\lambda_{\max}$  (рис 5.5).

При значній відмінності  $\lambda$  від значень, рекомендованих за рис. 5.5,

корегують електромагнітні навантаження ( $B_{\delta}$ ,  $A_a$ ) з урахуванням наведених вище рекомендацій.

### **Визначення конструктивної довжини якоря**

При  $l_{\delta} \leq 350$  мм конструктивна довжина якоря  $l_a = l_{\delta}$  з округленням до найближчого цілого числа при  $l_{\delta} \leq 100$  мм і до найближчого цілого числа, кратного п'яти, при  $l_{\delta} = (100 \dots 350)$  мм.

При  $l_{\delta} > 350$  мм застосовують радіальні вентиляційні канали (рис. 5.6) розміром  $l_k = 10$  мм.

Довжина одного пакета осердя вибирається в межах  $l_{\text{пак}} = (55 \dots 75)$  мм. Крайні пакети виконуються більшої довжини.

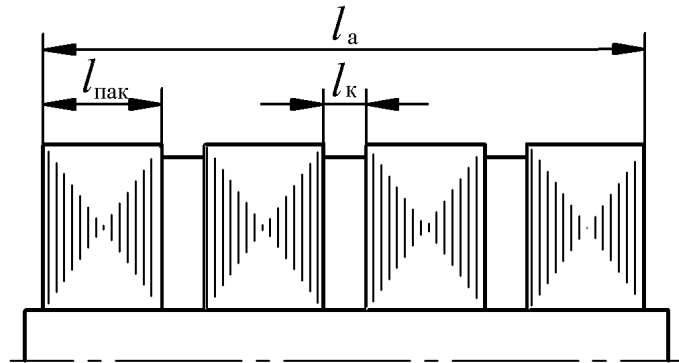


Рис. 5.6. Пакетований якір

При цьому конструктивна довжина осердя якоря з числом радіальних каналів  $n_{\text{кр}}$

$$l_a = l_{\text{пак}} \cdot n_{\text{пак}} + l_k \cdot n_{\text{кр}} \quad (5.5)$$

### **5.2. Вибір типу обмотки якоря**

Обмотка якоря (ОЯ) повинна задовольняти такі вимоги:

- ОЯ повинна бути розрахована на задані величини напруги й струму;
- ОЯ повинна мати достатню електричну, механічну й термічну міцність;
- конструкція ОЯ повинна забезпечувати задовільні умови струмознімання з колектора;
- витрати міді на ОЯ повинні бути мінімальними;
- технологія виготовлення ОЯ повинна бути за можливості простою.

Для одержання симетричної ОЯ необхідно, щоб відношення  $\frac{Z_e}{a} = \frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{Z \cdot U_{\text{П}}}{a}$  було цілим числом (ц. ч.). Для симетричного розташування паралельних гілок ОЯ в магнітному полі необхідне виконання

умов:  $\frac{Z}{a} = \text{ц. ч.}$  та  $\frac{2p}{a} = \text{ц. ч.}$

Число паралельних гілок ( $2a$ ) обмотки якоря визначається виходячи

з умов задовільної комутації, при якій струм паралельної гілки обмежують значенням  $(250...350) A$ . При цьому

$$2a \geq \frac{I_{ан}}{(250...350)} \quad (5.6)$$

повинне дорівнювати цілому та парному числу.

Тип обмотки якоря визначається співвідношенням числа її паралельних гілок  $2a$  й числа полюсів машини  $2p$ . Для збільшення заповнення пазів міддю, зменшення витрати ізоляційних матеріалів і трудомісткості виготовлення машини слід застосовувати обмотки з мінімально можливим числом паралельних гілок.

Тип ОЯ можна вибрати за табл. 5.3.

Таблиця 5.3

До вибору типу обмотки якоря

$2p$	$I_{ан}, A$	Тип обмотки
2	—	Проста петльова
4	$< 700$	Проста хвильова
4	$700 < I_{ан} < 1400$	Проста петльова, комбінована
4	$> 1400$	Двоходова петльова, комбінована

При виборі петльової або комбінованої обмотки у швидкохідних машинах ( $\mathcal{G}_a \leq 40 \text{ м/с}$ ) і в машинах, що працюють зі значними перевантаженнями, перевагу слід віддавати комбінованій обмотці; у тихохідних машинах і в машинах, що працюють з невеликими перевантаженнями, доцільніше застосування петльової обмотки.

Повний розрахунок ОЯ наведений у розд. 4.

### 5.3. Розрахунок перерізу ефективного провідника обмотки якоря

Переріз провідника обмотки якоря знаходять за густиною струму ОЯ  $j_a$ , яку вибирають за умови припустимого нагрівання й разом інших умов:

- одержання потрібного ККД;
- мінімуму повної вартості машини, включаючи експлуатаційні ви-

трати;

- потрібних характеристик.

Чим більше  $j_a$ , тим менші витрати обмотувального матеріалу та вартість обмотки. З цієї точки зору значення  $j_a$  слід вибирати найбільшим. Однак зі збільшенням  $j_a$  збільшуються втрати в обмотці та її нагрівання, тому що поверхня охолодження машини залишається незмінною.

Виходячи з цих суперечливих вимог рекомендується [10] вибирати густину струму в обмотці якоря з діапазону

$$j_a = (3 \dots 8) \text{ A / мм}^2.$$

Точніше попереднє значення густини струму ( $j'_a$ ) можна визначити з рис. 5.7.

Чим вищі напруга й потужність машини, тем менша припустима густина струму.

Вибір густини струму за припустимим тепловим навантаженням виконується за допомогою фактора нагрівання ( $A_a \cdot j_a$ ), який визначається за графіком  $(A_a \cdot j_a) = \varphi(D_a)$  з рис. 5.8. Для підвищення ККД машини рекомендується знизити густину струму, знайдену за фактором нагрівання, на (15–20) %.

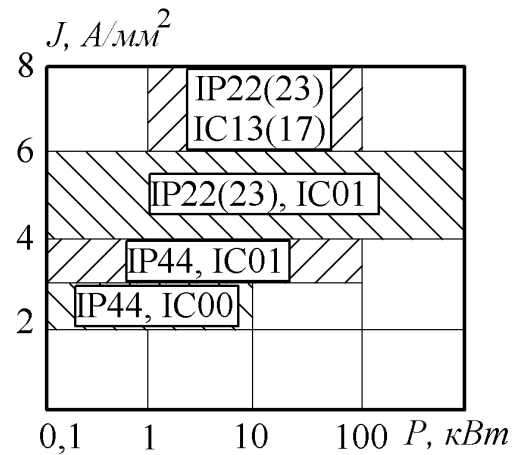


Рис. 5.7. До вибору густини струму в ОЯ

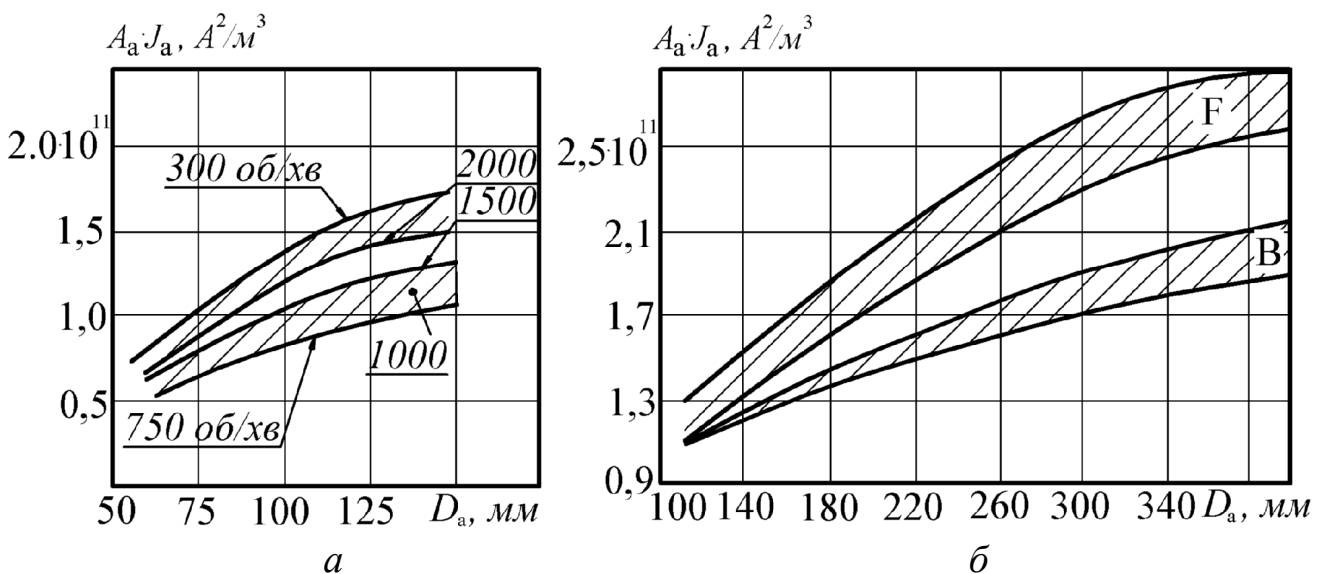


Рис. 5.8. Рекомендовані значення  $A_a \cdot j_a$ : а –  $2p = 2$ ; б –  $2p \geq 4$

При проектуванні тягових електричних машин для годинного режиму необхідно врахувати такі значення фактора нагрівання,  $A^2 / м^3$ :



$(A_a \cdot j_a) = (1,3...1,4) \cdot 10^{11}$  – для закритих ЕМ з ізоляцією класу  $B$  ;

$(A_a \cdot j_a) = (1,7...1,9) \cdot 10^{11}$  – для самовентильованих ЕМ класу  $B$  ;

$(A_a \cdot j_a) = (2,1...2,5) \cdot 10^{11}$  – для ЕМ з незалежною вентиляцією й швидкохідних самовентильованих машин з ізоляцією класу  $B$ .

Густина струму в ОЯ, обрана за рис. 5.7, перевіряється за фактором нагрівання,  $A/мм^2$ ,

$$j'_a = \frac{(A_a \cdot j_a)}{A_a} \cdot 10^{-6}. \quad (5.7)$$

Переріз ефективного провідника ОЯ (попереднє значення),  $мм^2$ ,

$$q'_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{ан}}}{2a \cdot j'_a}. \quad (5.8)$$

#### 5.4. Розрахунок числа пазів якоря

##### *Розрахунок числа провідників обмотки якоря*

Число ефективних провідників ОЯ  $N_a$ , розраховане за значенням лінійного навантаження,

$$N_{a(A)} = \frac{A_a \cdot \pi \cdot D_a \cdot 2a}{I_{\text{ан}}} \cdot 10^{-3}. \quad (5.9)$$

Число провідників ОЯ виходячи зі значення магнітної індукції

$$N_{a(B)} = \frac{k_e \cdot U_H \cdot 60 \cdot a}{\Phi_H \cdot p \cdot n} = 38,2 \cdot \frac{k_e \cdot U_H \cdot a}{n \cdot \alpha_\delta \cdot D_a \cdot l_\delta \cdot B_\delta}, \quad (5.10)$$

де  $n$  – частота обертання, *об/хв*.

Рівність значень  $N_{a(A)}$  і  $N_{a(B)}$  свідчить про корегування лінійного навантаження ( $A$ ) та індукції в зазорі ( $B_\delta$ ) при розрахунку довжини якоря за основним рівнянням ЕМ (5.4).

##### *Вибір форми пазів якоря*

У МПС з висотою осі обертання до 200 *мм* застосовують напівзакриті пази (рис. 5.15). Застосування напівзакритих пазів замість відкритих знижує магнітний опір повітряного зазору, зменшує поверхневі втрати в полюсних наконечниках внаслідок зменшення зубцевих пульсацій магнітного поля й полегшує кріплення обмотки в пазу клинами.

Переріз ефективного круглого провідника всипної ОЯ  $q_{\text{пр}} \leq 8,5 \text{ мм}^2$ . Діаметр елементарного провідника не повинен перевищувати  $1,9 \text{ мм}$ , число елементарних провідників  $n_{\text{ел}} \leq 3$ .

Недоліки всипної обмотки:

- мале заповнення паза міддю;
- ускладнення трудомісткості виготовлення обмотки;
- мала надійність корпусної ізоляції через її деформацію в процесі укладання обмотки.

При переріз провідника  $q_{\text{пр}} > 8,5 \text{ мм}^2$  обмотку виконують з прямокутного проводу, який укладається у відкриті пази з паралельними стінками (рис. 5.11, 5.12). Переріз елементарного провідника не повинен перевищувати  $(10 \dots 12) \text{ мм}^2$ , висота елементарного провідника вибирається за умови обмеження додаткових втрат від поля пазового розсіяння й залежить від частоти перемагнічування.

*Розрахунок числа пазів якоря, кількості ефективних провідників у пазу, числа витків у секції*

Орієнтуючись на дані серійних МПС, можна вибрати за табл. 5.4 попереднє значення зубцевого розподілу якоря  $t'_1$  і розрахувати попереднє число пазів якоря

$$z'_1 = \pi \cdot D_a / t'_1, \quad (5.11)$$

значення якого приймається залежно від типу ОЯ (розд.4).

Таблиця 5.4

Зубцевий розподіл якоря

$h_0, \text{ мм}$	80–200	225–315	355–500
$t'_1, \text{ мм}$	10–20	15–35	18–40

Для простої петльової ОЯ  $z'_1$  повинне бути **парним** числом, для простої хвильової – **непарним**.

Число ефективних провідників у пазу

$$N_{\text{п}} = N_{\text{а}} / z'_1 \quad (5.12)$$

повинне бути **парним** числом.

Число витків у секції рівносекційної ОЯ

$$w_c = \frac{N_{\Pi}}{2u_{\Pi}} = 1, 2, 3. \quad (5.13)$$

Тут  $u_{\Pi}$  – число елементарних пазів в одному реальному, або число провідників по ширині паза. Для симетричних простих хвильової або петльової обмотки й  $2p = 4$  воно повинно дорівнювати 3 або 5 (рис. 5.9).

Якщо при мінімальному значенні  $u_{\Pi}$  число витків у секції  $w_c < 1$ , то необхідно збільшити число паралельних гілок ( $2a$ ) ОЯ.

Число провідників у пазу  $N_{\Pi}$  для таких обмоток може приймати значення, що наведені у табл. 5.5.

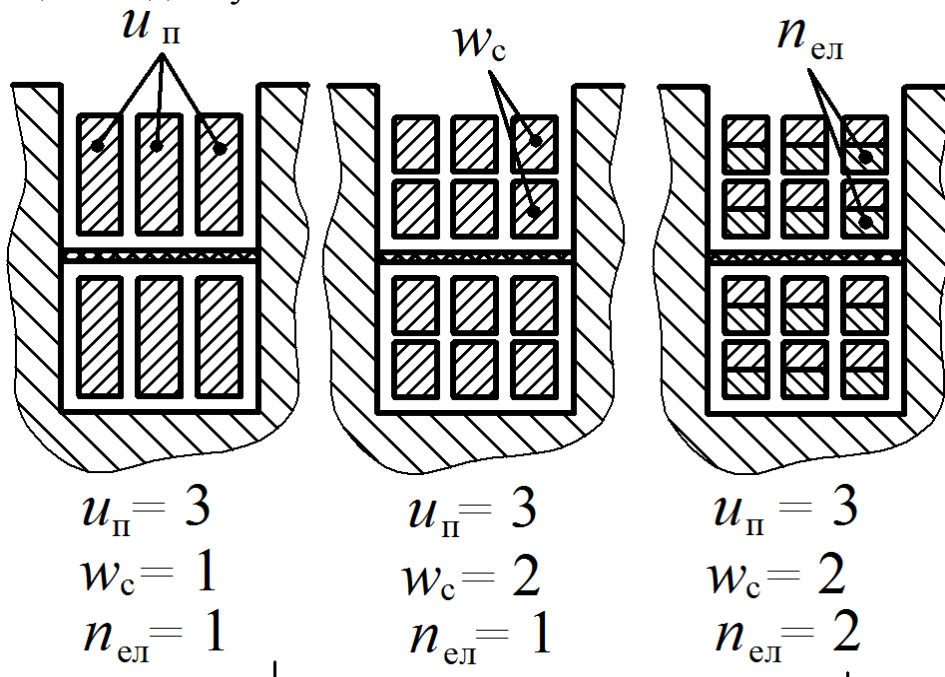


Рис. 5.9. Розміщення обмотки в пазу якоря МПС

Таблиця 5.5

Значення числа провідників у пазу

Число провідників по ширині паза	Значення $N_{\Pi}$ при		
	$w_c = 1$	$w_c = 2$	$w_c = 3$
$u_{\Pi} = 3$	6	12	18
$u_{\Pi} = 5$	10	20	30

У машинах на напругу до 440 В число витків у секції ( $w_c$ ) для зменшення величини реактивної ЕРС за можливості приймається рівним 1.

У МПС з напівзакритими пазами на якорі (рис. 5.15) число витків у секції ОЯ може прийматися рівним дробовому числу.

При цьому необхідно визначити число витків у кожній з  $u_{\Pi}$  секцій

по ширині паза якоря ( $w_{ci}$ ) виходячи з того, що розрахункове значення  $w_c$  повинне бути рівним середньому значенню  $w_c$ .

Наприклад, якщо при  $u_{\Pi} = 3$ , а число витків у секціях по ширині паза становить 1-1-2, то розрахункове значення

$$w_c = \frac{1+1+2}{3} = 1,33.$$

Розподіл витків у секціях по ширині паза ( $w_{ci}$ ) для деяких розрахункових значень  $w_c$  при  $u_{\Pi} = 3, 5$  наведений у табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Дробове число витків у секції  $w_c$

$u_{\Pi}$	Розподіл витків у секціях ( $w_{ci}$ )						
	$w_{ci}$	1-1-1	1-1-2	1-2-2	2-2-2	2-2-3	2-3-3
3	$w_c$	1	1,33	1,66	2	2,33	2,66
	$N_{\Pi}$	6	8	10	12	14	16
	$w_{ci}$	1-1-1-1-1	1-1-1-1-2	1-1-1-2-2	1-1-2-2-2	1-2-2-2-2	2-2-2-2-2
5	$w_c$	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
	$N_{\Pi}$	10	12	14	16	18	20

Визначення числа елементарних провідників ( $n_{ел}$ ) виконується у процесі розкладки провідників у пазу (рис. 5.9).

### 5.5. Розрахунок числа колекторних пластин

Число колекторних пластин  $K = Z \cdot u_{\Pi}$  повинне забезпечувати необхідну величину напруги між колекторними пластинами.

Значення середньої напруги між колекторними пластинами,  $B$ ,

$$U_K = U_H \cdot 2p/K, \quad (5.14)$$

для некомпенсованих МПС не повинне перевищувати (14...16)  $B$ , а за наявності компенсаційної обмотки – 22  $B$ .

При проектуванні МПС з регулюванням частоти обертання вверх від номінальної збільшенням напруги живлення необхідно в формулі (5.14) замість номінальної напруги  $U_H$  підставляти значення найбільшої напруги.

Максимальна напруга між колекторними пластинами,  $B$ ,

$$U_{K_{\max}} = U_K \cdot \frac{k_i}{\alpha_\delta} \leq U_{K_{\text{доп}}}, \quad (5.15)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт перекручування форми магнітного поля в повітряному зазорі [1]. Попередні значення  $k_i$  визначається за рис. 5.10 і уточнюється в процесі розрахунків  $\omega_{\max}$ .

Значення  $U_{K_{\text{доп}}}$  (табл. 5.7) зазначені за умови, що товщина ізоляційних прокладок між колекторними пластинами для МПС при  $h_0 = (80...280)$  мм становить 0,8 мм, а при  $h_0 = (315...355)$  мм – 1 мм.

Таблиця 5.7

Значення  $U_{K_{\text{доп}}}$

$h_0$ , мм	$2p$	$U_{K_{\text{доп}}}$ , В
80...100	2	100
112...200	4	50
225...315	4	30
355...500	4	25

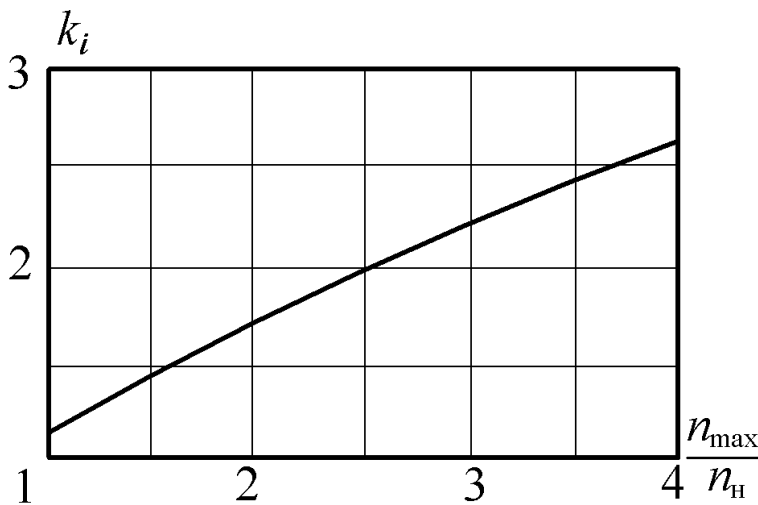


Рис. 5.10. Коефіцієнт перекручування

З точки зору обмеження пульсацій ЕРС на щітках, необхідно, щоб

$$K/2p \geq (17 - 20).$$

Число елементарних пазів ( $Z_e$ ), секцій ОЯ ( $S$ ), колекторних пластин

$$Z_e = S = K = z \cdot u_{\Pi}. \quad (5.16)$$

Число колекторних пластин ( $K$ ) повинне забезпечити величину колекторного розподілу ( $t_K$ ), не меншу від наданої у табл. 5.8,

$$t_K = \pi \cdot D_K / K, \quad (5.17)$$

де  $D_K$  – зовнішній діаметр колектора, мм,

$$D_K = (0,65...0,75) D_a$$

вибирається з ряду: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450 мм.

Таблиця 5.8

### Значення колекторного розподілу

$D_K, \text{мм}$	< 125	< 300	< 500	< 1000
$t_K, \text{мм}$	3,0	3,5	4,0	4,5

Число ефективних провідників обмотки якоря

$$N_a = z \cdot u_{\Pi} \cdot 2w_c = K \cdot 2w_c. \quad (5.18)$$

Уточнене значення лінійного навантаження якоря,  $A/м$ ,

$$A_a = \frac{N_a \cdot I_{ан}}{\pi \cdot D_a \cdot 2a} \cdot 10^3. \quad (5.19)$$

Якщо лінійне навантаження значно (більше ніж на 10 %) відрізняється від попереднього значення, то приймається інше значення числа пазів якоря ( $Z$ ) і розрахунки повторюють.

Після цього уточнюють розрахункову довжину машини

$$l_{\delta} = l_{\delta \text{ попер}} \cdot \frac{A_a \text{ попер}}{A_a}. \quad (5.20)$$

Правильність вибору числа пазів якоря перевіряють за умови комутації й нагрівання, обмежуючи повний струм паза,

$$\Sigma I_{\Pi} = I_{ан} \cdot N_{\Pi} / 2a. \quad (5.21)$$

$$\Sigma I_{\Pi} \leq 1500 \text{ A при } D_a < 1 \text{ м та } \Sigma I_{\Pi} \leq 2000 \text{ A при } D_a > 1 \text{ м;}$$

Основний магнітний потік,  $Вб$ ,

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6} = B_{\delta} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{2p} \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6}. \quad (5.22)$$

## 5.6. Розрахунки розмірів пазів якоря

### 5.6.1. Відкриті пази з паралельними стінками

Розрахунки бажано виконувати у такій послідовності.

Ширина зубця в мінімальному перерізі,  $мм$ ,

$$b_{z_{\min}} = b_{z_3} = \frac{B_{\delta}}{B_{z_{\max}}} \cdot \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{l_{ст} \cdot k_c}, \quad (5.23)$$

де  $k_c \approx 0,95$ , а значення  $B_{z_{\max}}$  вибирається з табл. 5.9 залежно від частоти перемагнічування  $f_{\text{пер}} = p \cdot n_{\text{п}} / 60$ ;

$t_1$  – зубцевий розподіл якоря, мм,

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{Z}; \quad (5.24)$$

$l_{\text{СТ}}$  – довжина сталі якоря з урахуванням пакетування (п. 5.1.5), мм,

$$l_{\text{СТ}} = l_a - l_k \cdot n_{\text{кр}}. \quad (5.25)$$

Задатися попереднім значенням висоти паза  $h_{\text{п}}$  за рис. 5.11.

Зубцевий крок по дну паза (рис. 5.12, 5.13), мм,

$$t_3 = \frac{\pi (D_a - 2h_{\text{п}})}{Z}. \quad (5.26)$$

Таблиця 5.9

Індукція в мінімальному перерізі  
зубців при прямокутних пазах якоря

Виконання ДПС	Магнітна індукція $B_{z_{\max}}$ , Тл, при частоті перемагнічування, Гц			
	100	75	50	< 25
IP22, IC01	1,9...2,1	2,0...2,2	2,1...2,3	2,2...2,4
IP44, IC0141	1,6...1,8	1,7...1,9	1,8...2,0	1,9...2,1
IP44, IC0041	1,5...1,7	1,6...1,8	1,7...1,9	1,8...2,0

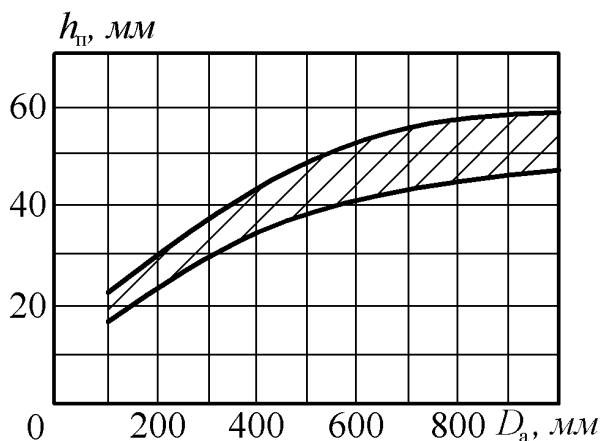


Рис. 5.11.  
Висота паза  
якоря  
 $h_{\text{п}} = \varphi(D_a)$

Ширина паза, мм,

$$b'_{\Pi} = t_3 - b_{z3} \quad (5.27)$$

За умовою технології необхідно, щоб  $b_{\Pi} > 7$  мм.

Вибір припуску на складання по ширині ( $b_{СКЛ}$ ) й висоті ( $h_{СКЛ}$ ) паза – за табл. 5.10, мм.

Вибір товщини пазової (корпусної) ізоляції по ширині паза ( $b_{ІК}$ ) і по висоті паза ( $h_{ІК}$ ) здійснюється за табл. 5.10, 5.11.

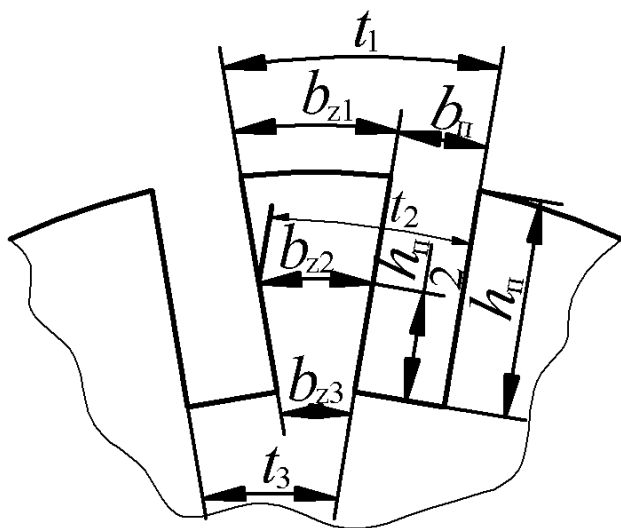


Рис. 5.12. Відкритий паз при кріпленні ОЯ бандажами

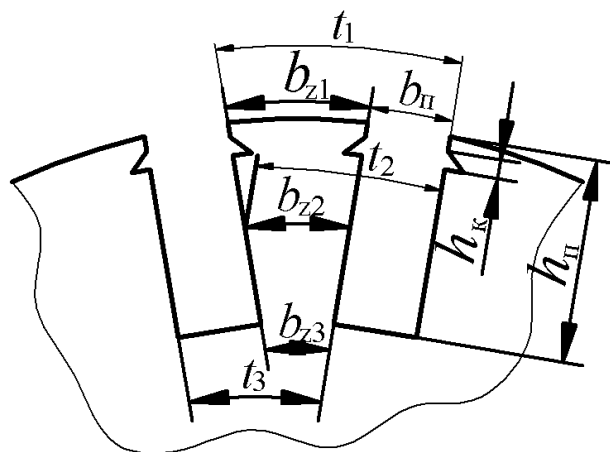


Рис. 5.13. Паз з паралельними стінками при кріпленні ОЯ клинами

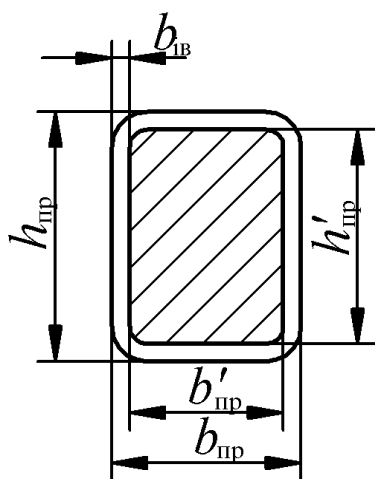


Рис. 5.14. Прямокутний провідник ОЯ

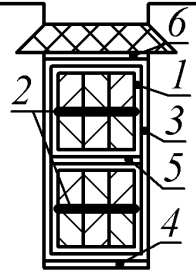
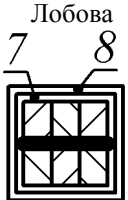
Для ОЯ машин з висотою осі обертання  $h_0 = (225...315)$  мм застосовується провід прямокутного перерізу (рис. 5.14) марок ПЕТВП (клас нагрівостійкості **B**) і ПЕТП-155 (клас **F**).

Для ОЯ машин з  $h_0 = (55...500)$  мм при класі ізоляції **B**, **F** – провід ПСД з додатковою ізоляцією склолентою, при класі **H** – провід ПСДКТ.



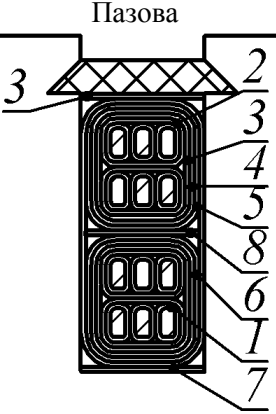
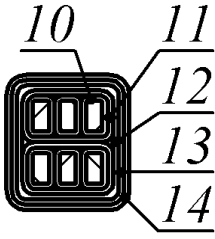
Таблиця 5.10

Ізоляція обмотки якоря машин постійного струму  
(пази відкриті, обмотка з прямокутного провідника,  $h_0 = 225 \dots 315$  мм, напруга 600 В)

Частини обмотки	Позиція на рис.	Матеріал, марка			Товщина, мм		Число шарів			Двостороння товщина ізоляції, мм			
		Клас нагрівостійкості					Клас нагрівостійкості		по ширині	по висоті при $W_C$			
		<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>F, H</i>	<i>B</i>	<i>F, H</i>		1	2	3	4
	1	Слюдопластофолій ІФГ-Б	Синтофолій F	Синтофолій Н	0,15	0,16	4,5 оберту	3,5 оберту	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	Те саме	Те саме	Те саме	0,15	0,16	0-6				0,3	0,6	0,9
	3	Склолакотканина ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Склотекстолит											
	4	СТ	СТЕФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЕФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	6	СТ	СТЕФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
		Припуск на укладку обмотки								0,3	0,5	0,5	0,5
	Загальна товщина ізоляції в пазу (без виткової, без висоти клина або без висоти бандажної канавки)								1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
	7	Склянолюдинитова стрічка	Плівка поліімідна марки ПМ 0,05 × 3		0,15		1 врів-нахльосту		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Склолента ЛЕС			0,1		Те саме		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Загальна товщина ізоляції котушки в лобовій частині (без виткової)								1	1	1	1

Таблиця 5.11

Ізоляція обмотки якоря ДПС (пази прямокутні, відкриті, обмотки двошарова петльова, хвильова, жаб'яча розрізна з твердими формованими котушками з проводу ПСД (клас нагрівостійкості  $F$ ) і ПСДК (клас нагрівостійкості  $H$ ),  $h_0 = 355 \dots 500$  мм, напруга 1 000 В

Частина обмотки	По- зи- ці- я	Матеріал		Товщина, мм		Число шарів		Двостороння товщина ізоляції, мм				
		Клас нагрівостійкості				Клас нагрівостійкості		по ширині				по- ви- соті
		$F$	$H$	$F$	$H$	$F$	$H$	2	3	4	5	
 <p>Пазова</p>	1	Скляна стрічка ЛЕС	Поліімідна плівка ПМ	0,1	0,05	1 впритиск	1 врівнахльосту	0,02	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Папір фенілоновий	—	0,05		1 впритиск		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Поліімідна плівка	ПМ	0,05		3 врівнахльосту		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Папір фенілоновий		0,05		1 впритиск		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Скляна стрічка ЛЕС		0,1		1 врівнахльосту		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Папір фенілоновий		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Склотекстолит	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	8	Те саме	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	9	Те саме	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
			Припуск на укладку	—	—		—		0,3	0,3	0,3	0,3
		Повна товщина ізоляції в пазу (без виткової, без висоти клина)		—		—		2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
 <p>Лобова</p>	10	Скляна стрічка ЛЕС	Поліімідна плівка ПМ	0,1	0,05	1 впритиск	1 врівнахльосту	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Папір фенілоновий		0,5		1 впритиск		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	12	Поліамідна плівка ПОМ		0,05		1 врівнахльосту		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Папір фенілоновий		0,05		1 впритиск		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Скляна стрічка ЛЕС		0,1		1 врівнахльосту		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
			Повна товщина ізоляції котушки в лобовій частині (без виткової)		—		—		1,2	1,2	1,4	1,4

Ширина ефективного провідника без ізоляції (рис. 5.14), мм,

$$b'_{\text{пр}} = \frac{b'_{\text{п}} - b_{\text{ік}} - b_{\text{скл}}}{u_{\text{п}}} - b_{\text{ів}}. \quad (5.28)$$

Висота ефективного провідника без ізоляції (рис. 5.14), мм,

$$h'_{\text{пр}} = \frac{h'_{\text{п}} - h_{\text{кл}} - h_{\text{ік}} - h_{\text{ш}} - h_{\text{скл}}}{2 \cdot w_{\text{с}}} - b_{\text{ів}}, \quad (5.29)$$

де  $h_{\text{ш}}$  – висота шлиця відкритого паза, мм;

$h_{\text{кл}}$  – висота клина або бандажної канавки ( $h_{\text{ок}}$ ), мм;

$b_{\text{скл}}$ ,  $h_{\text{скл}}$  – припуск на складання якоря по ширині та висоті паза за табл. 5.12, мм.

Таблиця 5.12

Припуски на складання якоря

$h_0$ , мм	$b_{\text{скл}}$ , мм	$h_{\text{скл}}$ , мм
80...132	0,1	-
160...200	0,2	-
225...315	0,3	0,3
355...400	0,35	0,3

Двостороння виткова ізоляція проводу ( $b_{\text{ів}}$ ) приймається за табл. 5.13 залежно від марки проводу ОЯ.

Таблиця 5.13

Двостороння виткова ізоляція проводу ( $b_{\text{ів}}$ )

$h_0$ , мм	Ізоляція	Провід	Менша сторона перерізу проводу, мм		
			0,85...1,9	2,12...3,75	4...5,6
225...315	<b>B</b>	ПЕТВП	0,1...0,12	0,15	—
	<b>F</b>	ПЕТП-155			
355...500	<b>B</b>	ПСД	0,27	0,33	0,4
	<b>F</b>	ПСДК			

У МПС з висотою осі обертання  $h_0 = (225 - 315)$  мм пазова частина ОЯ кріпиться в пазах склобандажами. При цьому пази якоря виконуються гладкими (рис. 5.12) без шлиців ( $h_{\text{ш}} = 0$ ). Глибина бандажної канавки ( $h_{\text{ок}}$ ) приймається за табл. 5.14 залежно від висоти осі обертання.

Глибина бандажної канавки

$h_0, \text{мм}$	225	250 ... 280	315
$h_{\text{БК}}, \text{мм}$	2	3	3,5

У МПС з висотою осі обертання  $h_0 = 355 \div 500$  мм кріплення ОЯ виконується клинами (рис. 5.13) висотою  $h_{\text{КЛ}} \approx 4$  мм, висота шлиця паза  $h_{\text{Ш}} = 1$  мм.

**Розмір провідника за висотою  $h_{\text{ПР}}$  не повинен перевищувати таких значень:** при частоті перемагнічування  $f \leq 25$  Гц –  $h_{\text{ПР}} \leq 10$  мм, при  $f \leq 50$  Гц –  $h_{\text{ПР}} \leq 7$  мм, при  $f \leq 100$  Гц –  $h_{\text{ПР}} \leq 4$  мм.

Якщо  $h_{\text{ПР}}$  перевищує зазначену гранично припустиму величину, то ефективний провідник складається з декількох елементарних ( $n_{\text{ЕЛ}}$ ), розташованих за висотою паза (рис. 5.9).

Розміри неізолюваного провідника визначаються з таблиці Додатка В. За розмірами провідника  $b'_{\text{ПР}}$ ,  $h'_{\text{ПР}}$ , перерізу  $q'_{\text{ПР}}$  та кількістю елементарних провідників  $n_{\text{ЕЛ}}$  вибирають найближчий стандартний провідник з розмірами  $b_{\text{ПР}}$ ,  $h_{\text{ПР}}$ , а також перерізом, близьким до  $n_{\text{ЕЛ}} \cdot q_{\text{ПР}} \approx q'_{\text{ПР}}$ .

Визначення розмірів паза в штампі, мм:

$$\text{ширина паза} \quad b_{\text{П}} = (b_{\text{ПР}} + b_{\text{ІВ}}) \cdot u_{\text{П}} + b_{\text{ІК}} + b_{\text{СКЛ}}; \quad (5.30)$$

висота паза

$$h_{\text{П}} = 2w_{\text{С}} \cdot n_{\text{ЕЛ}} \cdot (h_{\text{ПР}} + b_{\text{ІВ}}) + h_{\text{ІК}} + h_{\text{КЛ}} + h_{\text{Ш}} + h_{\text{СКЛ}}, \quad (5.31)$$

де  $n_{\text{ЕЛ}}$  – число елементарних провідників в одному ефективному;

$b_{\text{ПР}}$ ,  $h_{\text{ПР}}$  – розміри елементарного провідника за шириною і висотою паза, мм.

Розміри паза  $b_{\text{П}}$ ,  $h_{\text{П}}$  округляють до найближчої більшої десятої частки міліметра.

Після визначення розмірів паза необхідно визначити за формулами (5.23), (5.26) величину зубцевого розподілу ( $t_3$ ) по дну паза й ширину зубця в мінімальному перерізі ( $b_{z_{\text{min}}}$ ), перевірити індукцію в мінімальному перерізі зубця

$$B_{z_{\max}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z_{\min}} \cdot l_{\text{СТ}} \cdot k_{\text{С}}}, \quad (5.32)$$

значення якої повинне задовольняти рекомендації табл. 5.9.

За обраним значенням перерізу провідника ОЯ ( $q_{\text{Пр}}$ ) визначається остаточне значення густини струму в ОЯ

$$j_{\text{а}} = \frac{I_{\text{ан}}}{2a \cdot n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{Пр}}}. \quad (5.33)$$

**За правильно виконаної розкладки ОЯ в пазу  $j_{\text{а}} \approx j'_{\text{а}}$ .**

### 5.6.2. Напівзакриті овальні пази

При класі нагрівостійкості ізоляції **B** застосовують провід круглого перерізу марки ПЕТВ, класі **F** – ПЕТ-155 (Додаток Б).

Вибір розмірів стандартного круглого провідника ( $d_{\text{Г}} / d_{\text{із}} / q_{\text{Пр}}$ ) виконується за знайденим попереднім значенням перерізу  $q'_{\text{Пр}}$ .

Знайдене значення стандартного діаметра повинне задовольняти технологічній вимозі –  $d_{\text{Пр}} \leq (1,8...2)$  мм. Якщо буде потреба, ефективний провідник складають з двох-трьох елементарних, тобто  $n_{\text{ел}} = 2, 3$ .

Ширину шлиця (рис. 5.15) можна розрахувати виходячи з діаметра елементарного ізолюваного провідника  $b_{\text{Ш}} \approx d_{\text{Пр}} + (1,5...2)$  мм або  $b_{\text{Ш}} \approx 2d_{\text{Пр}}$ , висота шлиця  $h_{\text{Ш}} = (0,6...1)$  мм.

Попереднє значення висоти паза ( $h_{\text{П}}$ ) приймається за рис. 5.11.

Товщина пазової ізоляції визначається за табл. 5.15.

Попереднє значення площі паза розраховується за формулою,  $\text{мм}^2$ ,

$$S'_{\text{П}} = \frac{N_{\text{П}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{Пр}}}{k_{\text{М}}}, \quad (5.34)$$

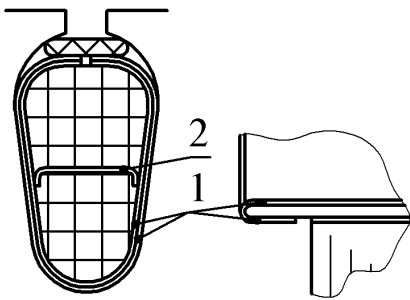
де  $N_{\text{П}}$  – число ефективних провідників у пазу;  $q_{\text{Пр}}$  – переріз стандартного елементарного провідника без ізоляції,  $\text{мм}^2$ ;

$k_{\text{М}} = (0,36...0,4)$  – коефіцієнт заповнення площі паза якоря міддю.

Ширина зубця, мм,

$$b_{\text{z}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{\text{z}} \cdot l_{\text{СТ}} \cdot k_{\text{С}}}, \quad (5.35)$$

де  $k_c \cong 0,95$ ;  $B_z = \varphi(f_{\text{пер}})$  за табл. 5.16.



Таблиця 5.15

Ізоляція обмотки якоря  
двигунів постійного струму  
(пази овальні напівзакриті,  
обмотка двошарова всипна з круглого  
емальованого проводу, напруга до 600 В)

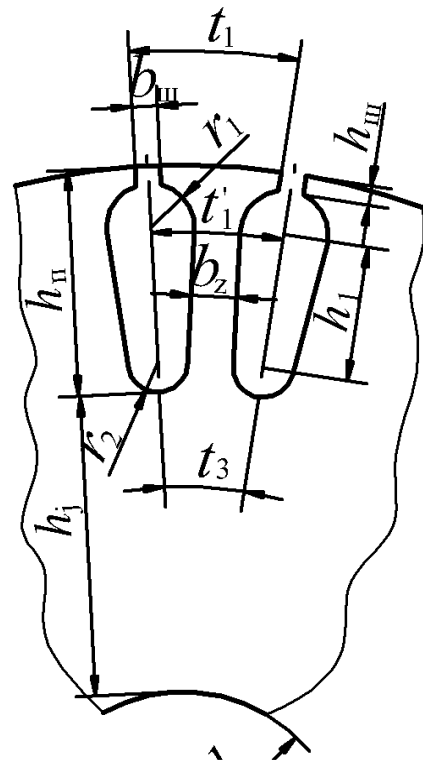
Висота осі обертання, мм	Позиція на рисунок	Матеріал			Товщина, мм	Число шарів	Одно- сто- роння товщина, мм
		Клас нагрівостійкості					
		<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>			
		Плівкосклопласт					
80...112	1, 2	Ізофлекс	Імідофлекс	0,35	1	0,35	
		Плівкосклопласт					
132...200	1, 2	Ізофлекс	Імідофлекс	0,25	2	0,5	

Примітка. В лобових частинах обмотки прокладка між котушками вико-  
нується з ізофлекса.

Таблиця 5.16

Індукція в зубцях  
при овальних пазах якоря

Виконання МПС	Магнітна індукція $B_z$ , Тл, при частоті перемагнічування, Гц			
	100	75	50	< 25
IP22, IC01, IC17	1,65	1,75	1,85	1,9
IP44, IC37	1,85	1,95	2,05	2,1
IP44, IC0141	1,4 1,6	1,5 1,7	1,55 1,75	1,6 1,8



IP44, IC0041	1,3	1,3	1,5	1,55
	...	...	...	...
	1,5	1,6	1,7	1,75

Розміри паза (рис. 5.15) можна визначити зі співвідношень, мм,

$$r_1 = \frac{\pi(D_a - 2h_{III}) - Z \cdot b_z}{2(Z + \pi)}; \quad (5.36)$$

$$r_2 = \frac{\pi(D_a - 2h_{II}) - Z \cdot b_z}{2(Z - \pi)}; \quad (5.37)$$

$$h_1 = h_{II} - h_{III} - r_1 - r_2. \quad (5.38)$$

Розміри паза округляються до десятих часток міліметра.

Після розрахунків розмірів паза перевіряється площа паза у світлу, мм<sup>2</sup>,

$$S_{II} = \frac{\pi}{2} \left[ (r_1 - b_{СКЛ})^2 + (r_2 - b_{СКЛ})^2 \right] + (r_1 + r_2 - b_{СКЛ}) \cdot h_1, \quad (5.39)$$

де  $b_{СКЛ}$  – припуск на складання по ширині паза (табл. 5.10), мм.

Можливість розміщення ОЯ визначається технологічним коефіцієнтом заповнення паза:

– вільна площа паза під обмотку, мм<sup>2</sup>,

$$S_{Пв} = S_{II} - S_{із} - S_{КЛ}, \quad (5.40)$$

де  $S_{із}$  – площа пазової ізоляції, мм<sup>2</sup>,

$$S_{із} \approx b_{із}(2\pi \cdot r_1 + \pi \cdot r_2 + 2h_1); \quad (5.41)$$

$S_{КЛ}$  – площа клина, мм<sup>2</sup>.

При кріпленні ОЯ в пазу клином

$$S_{КЛ} + S_{Пр} \approx (3 - 5) \cdot r_1. \quad (5.42)$$

При кріпленні ОЯ в пазу ізоляційною кришкою

$$S_{КЛ} + S_{Пр} \approx (1,5 \dots 2,5) \cdot r_1 \quad (5.43)$$

Технологічний коефіцієнт заповнення вільної площі паза ізольованими провідниками

$$k_{\text{зап}} = \frac{2 \cdot w_c \cdot u_{\text{п}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot d_{13}^2}{S_{\text{пв}}} = \frac{N_{\text{п}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot d_{13}^2}{S_{\text{пв}}}, \quad (5.44)$$

який повинен бути в межах  $k_{\text{зап}} = (0,68 \dots 0,72)$ .

Після розрахунків розмірів пазів і вибору нормалізованих провідників ОЯ треба розрахувати остаточне значення густини струму в ОЯ ( $j_a$ ) і індукцію в зубці якоря ( $B_z$ ), які не повинні відрізнятися від попередніх значень більш ніж на 10 %.

### 5.6.3. Розміри секції обмотки якоря

Крок ОЯ по реальних пазах

$$y_z = \frac{Z}{2p} - \xi. \quad (5.45)$$

Середній зубцевий розподіл якоря, мм,

$$t_1 = \pi (D_a - h_{\text{п}}) / Z. \quad (5.46)$$

Середня ширина секції, мм,

$$b_c = t_1 \cdot y_z. \quad (5.47)$$

Середня довжина однієї лобової частини секції ОЯ при **напівзакритих** пазах на якорі, мм,

$$l_{\text{л}} = (0,7 + 0,4p) \cdot b_c + 15. \quad (5.48)$$

Середня довжина однієї лобової частини секції ОЯ при **відкритих** пазах на якорі, мм,

$$l_{\text{л}} = 1,2b_c + h_{\text{п}} + 40. \quad (5.49)$$

Середня довжина витка ОЯ, мм,

$$l_{\text{ва}} = 2(l_a + l_{\text{л}}). \quad (5.50)$$

Середня довжина вильоту лобової частини ОЯ при **напівзакритих** пазах на якорі [5], мм,

$$l_{\text{вил}} = (0,12 + 0,14p) \cdot b_c + 7,5. \quad (5.51)$$

Середня довжина вильоту лобової частини ОЯ при **відкритих** пазах на якорі [5], мм



$$l_{\text{вил}} = 0,3b_c + 0,5h_{\text{II}} + 20. \quad (5.52)$$

Активний опір ОЯ, Ом

$$r_a = \frac{\rho_{\text{Cu}} \cdot N_a \cdot l_{\text{ва}}}{2 \cdot (2a)^2 \cdot n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{ел}}} \cdot 10^3, \quad (5.53)$$

де  $\rho_{\text{Cu}}$  – питомий електричний опір міді при робочій ( $t_p$ ) температурі (табл. 5.17).

Для класу нагрівостікості  $B - t_p = 75^\circ \text{C}$ , для класів  $F, H - t_p = 115^\circ \text{C}$ .

Таблиця 5.17

Питомий електричний опір міді

Температура, $^\circ \text{C}$	20	75	115
$\rho_{\text{Cu}}, 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	17,5	21,3	24,4

### 5.7. Розрахунок компенсаційної обмотки

Компенсаційна обмотка застосовується у таких випадках:

- високошвидкісні машини постійного струму ( $n_H > 2500 \text{ об / хв}$ );
- МПС з широким діапазоном регулювання частоти обертання зменшенням магнітного потоку ( $n_{\text{max}}/n_H > (3...4)$ );
- МПС, що працюють у режимі частих пусків, реверсів і перевантажень;
- МПС понад  $100 \text{ кВт}$  при  $P_H/n_H > 0,2 \frac{\text{кВт}}{\text{об / хв}}$ .

Застосування компенсаційної обмотки дозволяє таке:

- компенсувати магніторушійну силу (МРС) якоря під полюсом;
- виключити деформацію розподілу магнітного поля під полюсом;
- зберегти незмінною найбільшу індукцію в повітряному зазорі в режимі неробочого ходу і під навантаженням МПС;
- зменшити  $U_{\text{Kmax}}$ ;
- зменшити пульсацію індукції в повітряному зазорі;
- зменшити додаткові втрати в машині;
- зменшити МРС додаткового полюса.

Основним при з'ясуванні необхідності застосування компенсаційної обмотки є зменшення деформації основного магнітного поля й напруги між колекторними пластинами  $U_{\text{Kmax}}$ .

КО включається послідовно в яріне коло машини. Деформація кривої

розподілу основного магнітного поля під головним полюсом повністю усувається при виконанні умови  $A_K = A_a$ . Однак практично витримати цю умову ніколи не вдається. Вважається, що КО виконує свої функції, якщо лінійні навантаження якоря ( $A_a$ ) й КО ( $A_K$ ) задовольняють співвідношення

$$A_K = (0,85 \dots 1,15) \cdot A_a. \quad (5.54)$$

Конструктивно КО виконується [5] одношаровою котушковою або стрижневою (рис. 5.16) і укладається в пази (рис. 5.17) полюсних наконечників головних полюсів (рис. 5.18).

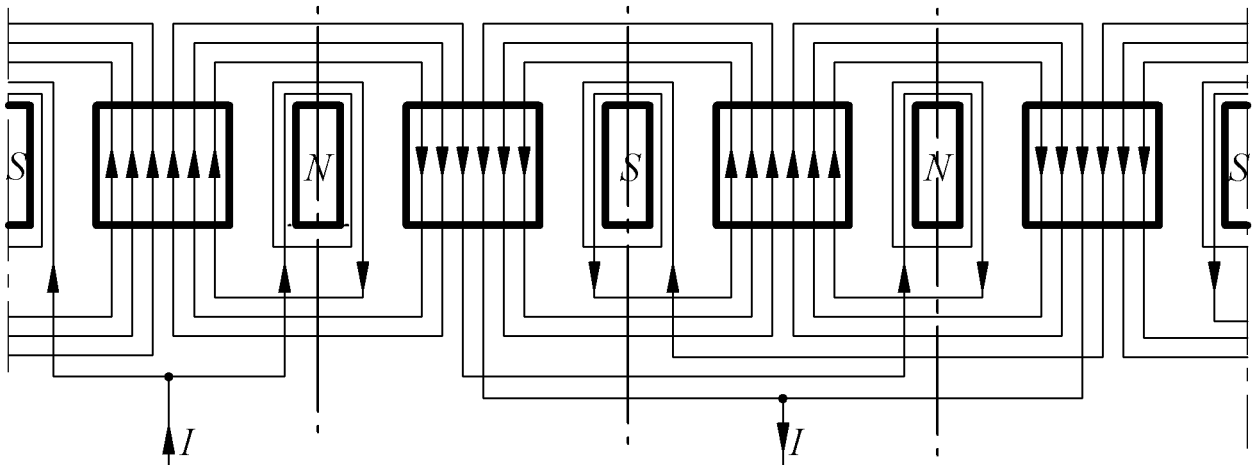


Рис. 5.16. Виконання КО

При струмі якоря  $I_{ан} < 1000 \text{ A}$  приймається число паралельних гілок  $a_K = 1$ , при  $I_{ан} > 1000 \text{ A}$  –  $a_K = 2$ .

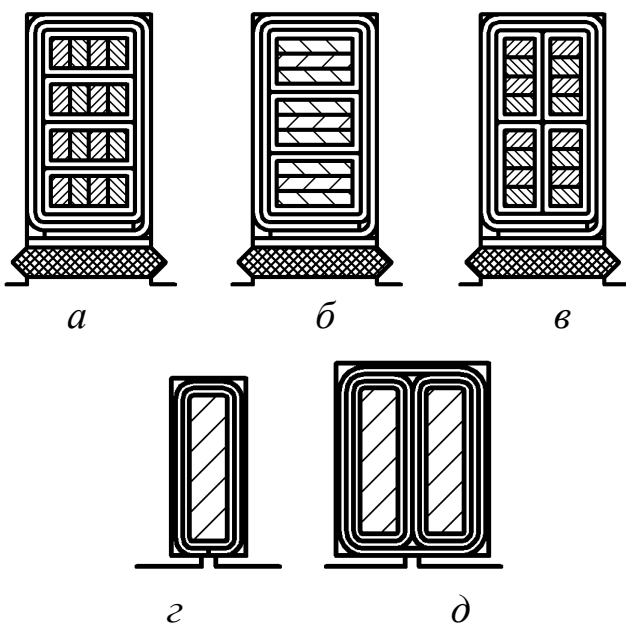


Рис. 5.17. Пази КО

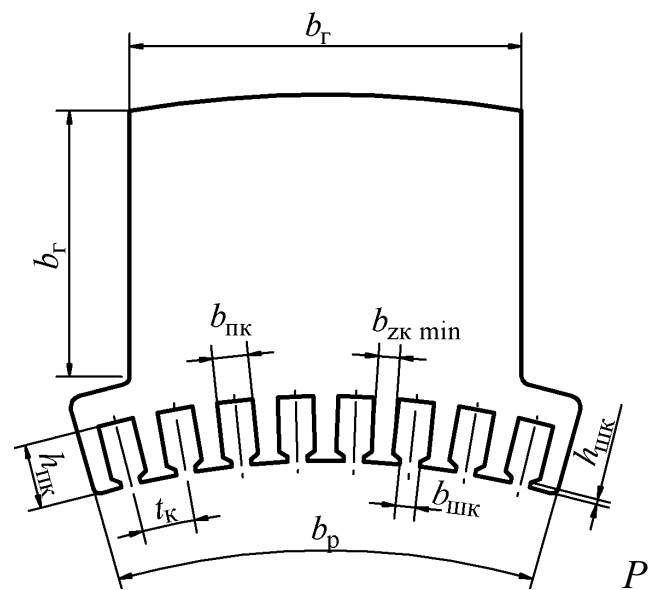


рис. 5.18. Зубцева зона головного полюса з КО

Число стрижнів КО на полюс

$$N_K = \frac{A_K \cdot a_K \cdot b_p}{I_a} \cdot 10^{-3}, \quad (5.55)$$

де  $b_p = \alpha_\delta \cdot \tau - 2\delta_0$  – ширина полюсного наконечника головного полюса (рис. 5.18), мм.

При номінальній напрузі до 1 000 В число пазів компенсаційної обмотки  $Z_K = (6...8)$ , при  $U_H > 1000 В - Z_K = (8...12)$ .

Число провідників у пазу КО

$$N_{ПК} = N_K / Z_K. \quad (5.56)$$

Число провідників по висоті паза (рис. 5.17)

$$N_{ВК} = N_{ПК} / u_{ШК}, \quad (5.57)$$

де  $u_{ШК} = 1, 2$  – число провідників по ширині паза КО.

Після розрахунку числа провідників КО уточнюють лінійне навантаження КО, А/м,

$$A_K = \frac{N_K \cdot I_a}{a_K \cdot b_p} \cdot 10^3, \quad (5.58)$$

яке повинне задовольняти співвідношення (5.54).

Для того щоб виключити магнітні вібрації та шум, необхідно, щоб зубцевий розподіл КО не був рівним зубцевому розподілу якоря, що враховується співвідношенням

$$t_K \neq (0,9...1,1) \cdot t_1. \quad (5.59)$$

Якщо цю умову неможливо виконати, застосовують скіс пазів на якорі на один зубцевий розподіл.

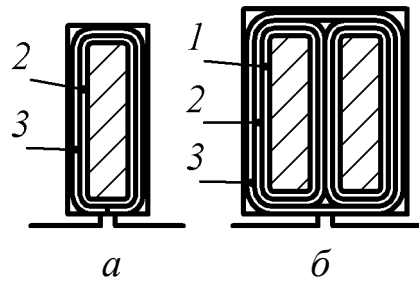
Зубцевий розподіл у мінімальному перерізі зубця основного полюса (рис. 5.18), мм,

$$t_{K_{\min}} = \frac{b_p}{Z_K} \cdot \frac{D_a + 2\delta_\Gamma + 2h_{ШК}}{D_a + 2\delta_\Gamma}, \quad (5.60)$$

де  $h_{ШК}$  – висота шлиця паза КО;  $h_{ШК} = (0,6...1)$  мм.

Висота клина кріплення КО  $h_{КЛ} \approx 2,5$  мм.

Таблиця 5.18



Ізоляція компенсаційної обмотки машин постійного струму  
(пази прямокутні напівзакриті, обмотка одношарова стрижнева,  
 $h_0 = 355 \dots 500$  мм, напруга до 1000 В)

По- зи- ція	Матеріал						Число шарів			Двостороння товщина ізоляції				
	Клас нагрівостійкості			Товщина, мм			Клас нагрівостійкості			Рисунок а		Рисунок б		
				В	Ф	Н				по ширині	по висоті	по ширині	по висоті	
	В	Ф	Н	В	Ф	Н	В	Ф	Н	по ширині	по висоті	по ширині	по висоті	
1	Скляношліфна лента ЛС-ПЕ-994-ТП		Поліімідна плівка ПМ	0,1	0,1	0,05	1 півнахльосту		2 півнахльосту	—	—	0,8	0,8	
2	Слюдопластофолій ІФГ-Б	Синтофолій F	Синтофолій Н	0,15	0,16	0,16	4,5 оберту	3,5 оберту	3,5 оберту	1,1	1,1	1,1	1,1	
3	Лакотканеслюдопласт ГТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фенілоновий папір		0,15	0,15	0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3	
—	Допуск на укладку обмотки										0,2	0,4	0,3	0,4
—	Загальна товщина ізоляції в пазу										1,6	1,8	2,5	2,6

Ширина зубця КО в мінімальному перерізі, мм,

$$b_{\text{ЗК}_{\min}} = \frac{B_{\delta}}{B_{\text{ЗК}_{\max}}} \cdot \frac{t_{\text{К}_{\min}} \cdot \sigma_{\text{ПН}}}{k_{\text{с}}}, \quad (5.61)$$

де  $\sigma_{\text{ПН}} \approx 1,05$  – коефіцієнт магнітного розсіяння полюсного наконечника;  
 $B_{\text{ЗК}_{\max}}$  – найбільша індукція в мінімальному перерізі зубця полюсного наконечника:

$B_{\text{ЗК}_{\max}} \approx (1,4 \dots 1,6) Tл$  – для товстолистової сталі;

$B_{\text{ЗК}_{\max}} \approx (1,8 \dots 1,9) Tл$  – для холоднокатаної електротехнічної сталі.

Ширина паза в штампі (рис. 5.18), мм,

$$b_{\text{ПК}} = t_{\text{К}_{\min}} - b_{\text{ЗК}_{\min}}. \quad (5.62)$$

Припустима ширина стрижня КО, мм,

$$b_{\text{стр}} = \left( b_{\text{ПК}} - b_{\text{ІЗ}_{\text{к}}} - b_{\text{СКЛ}} \right) / u_{\text{ШК}}, \quad (5.63)$$

де  $b_{\text{ІЗ}_{\text{к}}}$  – двостороння товщина ізоляції по ширині паза КО (табл. 5.18):  $b_{\text{ІЗ}_{\text{к}}} = 1,6$  мм при  $u_{\text{ШК}} = 1$  й  $b_{\text{ІЗ}_{\text{к}}} = 2,5$  мм при  $u_{\text{ШК}} = 2$ ;

$b_{\text{Зб}} \approx 0,3$  мм – припуск на складання по ширині паза.

Густина струму в стрижнях КО ( $j_{\text{СТ}}$ ) визначається класом нагрівостійкості ізоляції за табл. 5.19.

Таблиця 5.19

Густина струму в стрижнях КО

Клас нагрівостійкості	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
$j_{\text{стр}}, A/\text{мм}^2$	4,7...5,2	5,3...5,8	6...6,6

Переріз стрижня КО, мм<sup>2</sup>,

$$q_{\text{стр}} = I_{\text{АН}} / \left( a_{\text{к}} \cdot j_{\text{стр}} \right). \quad (5.64)$$

Висота стрижня КО, мм,

$$h_{\text{стр}} = q_{\text{стр}} / b_{\text{стр}}, \quad (5.65)$$

За сортаментом вибирається провідник стандартного перерізу, перевіряється ширина й висота паза, густина струму в КО.

Довжина стрижня, мм,

$$l_{\text{стр}} = l_{\Gamma} + 200, \quad (5.66)$$

де  $l_{\Gamma}$  – довжина головного полюса, мм.

Стрижні з'єднуються дугою з неізолюваного мідного проводу (рис. 5.19).

Густина струму в дугах, А/мм<sup>2</sup>,

$$j_{\text{дуг}} \approx (0,75 \dots 0,85) \cdot j_{\text{к}}. \quad (5.67)$$

Площа перерізу дуг, мм<sup>2</sup>,

$$q_{\text{дуг}} = I_{\text{ан}} / (a_{\text{к}} \cdot j_{\text{дуг}}) \quad (5.68)$$

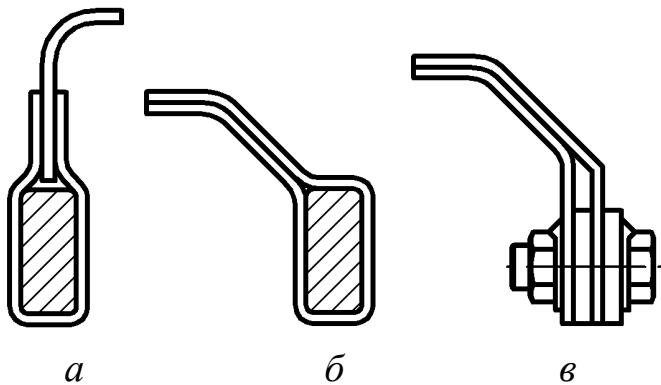


Рис. 5.19.

З'єднання КО:

*a* – паяне з хомутиком;

*б* – паяне без хомутика;

*в* – болтове

Більший розмір проводу дуги, мм,

$$h_{\text{дуг}} = (1,6 \dots 1,8) \cdot h_{\text{стр}}. \quad (5.69)$$

Менший розмір проводу дуги, мм,

$$b_{\text{дуг}} = q_{\text{дуг}} / h_{\text{дуг}}. \quad (5.70)$$

За сортаментом вибирається провід стандартного перерізу, перевіряється густина струму в дугах.

Середня довжина дуги між стрижнями КО, мм,

$$l_{\text{дуг}} = 4,4 D_a / 2p. \quad (5.71)$$

Активний опір компенсаційної обмотки, Ом,

$$r_{\text{к}} = \frac{2p \cdot \rho_{\text{Cu}} \cdot 10^{-3}}{a_{\text{к}}^2} \cdot \left( \frac{l_{\text{стр}}}{q_{\text{стр}}} + \frac{l_{\text{дуг}}}{q_{\text{дуг}}} \right). \quad (5.72)$$

## 5.8. Розрахунок повітряного зазору під головним полюсом

### 5.8.1. Розрахунок величини повітряного зазору

При виборі повітряного зазору під основними полюсами необхідно врахувати такі суперечливі вимоги:

- з метою зменшення МРС збудження слід зменшувати зазор;
- від величини зазору залежить вплив реакції якоря на роботу машини, який повинен бути обмежений;
- із зменшенням зазору сильніше виявляється вплив зубцевого шару якоря (ростуть додаткові втрати в полюсних наконечниках, збільшується коливання потоку полюсів та ін.);
- зазор не може бути меншим від певної величини за механічних умов, які пов'язані із зношуванням підшипників, початковим ексцентриситетом при збиранні, прогином вала, однобічним магнітним тяжінням і т. п.

У машинах з *компенсаційною* обмоткою повітряний зазор значно менший й вибирається головним чином за механічних умов.

У *некомпенсованих* машинах постійного струму повітряний зазор приймається відносно більшим через необхідність послабити вплив поля якоря на основне магнітне поле машини.

Значення величини повітряного зазору визначається за умови, щоб при номінальному навантаженні поле в повітряному зазорі протягом полюсної дуги не змінювало знака (не перекидалось).

Ця умова формулюється у такий спосіб [12]:

$$\frac{F_{\delta zj}}{0,5 A_a \cdot b_p} \cdot 10^3 \geq k_{cm},$$

де  $k_{cm}$  – коефіцієнт, що враховує структуру магнітного кола машини:

$k_{cm} = 1,3$  – для МПС без додаткових полюсів;

$k_{cm} = 1$  – для МПС з додатковими полюсами без КО;

$k_{cm} = 0,75$  – для МПС з додатковими полюсами та КО.

$F_{\delta zj} = F_{\delta} + F_z + F_j$  – МРС перехідного шару машини.

Величина повітряного зазору під головним полюсом, мм,

$$\delta_{\Gamma} \geq k_{cz} \cdot k_{cm} \cdot \frac{A_a \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6}, \quad (5.73)$$

де  $k_{cz}$  – коефіцієнт, що враховує структуру зубцевого шару машини:

$k_{cz} = (0,46 \dots 0,5)$  – при напівзакритих пазах якоря;

$k_{cz} = (0,43 \dots 0,46)$  – при відкритих пазах із клинами;

$k_{сз} = (0,35...0,43)$  – при відкритих пазах із дрововими бандажами;  
 $A_a, B_{\delta}$  – лінійне навантаження якоря,  $A/м$ , та індукція в повітряному зазорі,  $Tл$ ;  
 $\alpha_{\delta}$  – розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги;  
 $\tau$  – полюсний розподіл,  $мм$ .

Формула (5.73) слухна для МПС з невеликим  
 $\left( n_{\max}^* = \frac{n_{\max}}{n_H} \leq (2...2,5) \right)$  діапазоном регулювання частоти обертання.

При більших діапазонах регулювання частоти обертання зменшенням магнітного потоку необхідно забезпечити сталу роботу МПС при перекидному магнітному полі та мінімальному значенні МРС перехідного шару  $F_{\delta zj_{\min}}$ .

При цьому величину зазору ( $мм$ ) для МПС **без компенсаційної** обмотки слід розраховувати за виразом

$$\delta_{\Gamma} = (0,35...0,4) \cdot k_{см} \cdot \sqrt{\frac{n_{\max}}{n_H}} \cdot \frac{A_a \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6}. \quad (5.74)$$

Правильність вибору величини зазору перевіряється після розрахунків характеристики намагнічування машини перевіркою на перекидання магнітного поля під головним полюсом.

Для МПС із **компенсаційною** обмоткою величина зазору розраховується за формулою (5.73).

### 5.8.2. Вибір конфігурації зазору

#### Рівномірний повітряний зазор

При наявності в ДПС компенсаційної обмотки повітряний зазор приймається рівномірним (рис. 5.20) [1; 6; 7]. Дійсна ширина полюсного наконечника,  $мм$ ,

$$b_p = b_{\delta} - 2\delta_0 = \alpha_{\delta} \cdot \tau - 2\delta_0, \quad (5.75)$$

де  $\delta_0 = \delta'_{\Gamma}$  – зазор по осі головного полюса,  $мм$ .



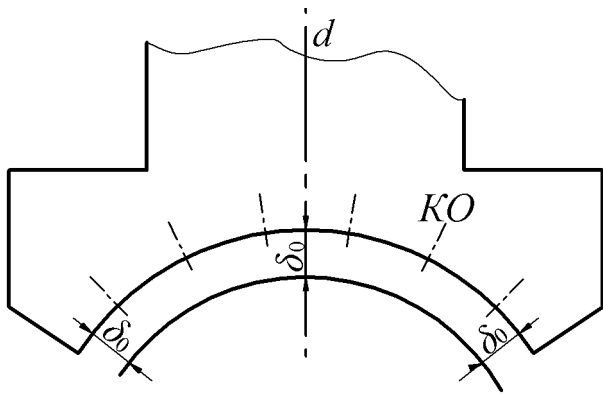


Рис. 5.20. Рівномірний повітряний зазор

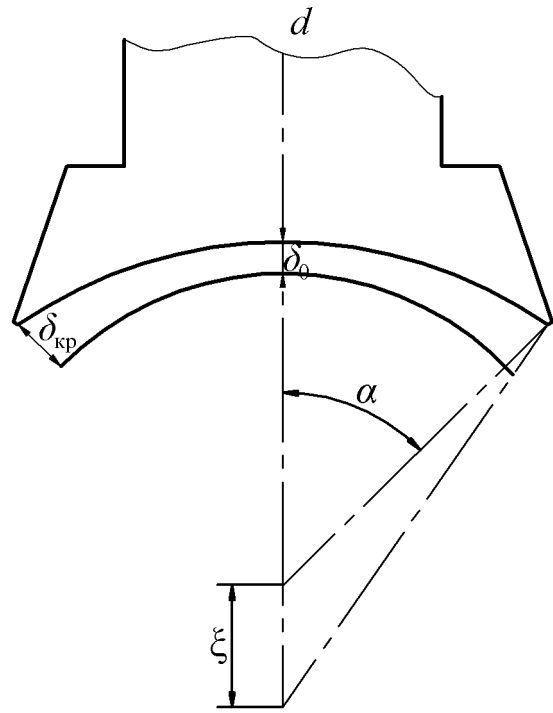


Рис. 5.21. Ексцентричний повітряний зазор

### **Нерівномірний повітряний зазор**

З метою зменшення деформації кривої розподілу магнітного поля при навантаженні машини повітряний зазор виконується нерівномірним. У тягових машинах повітряний зазор виконується [6] **ексцентричним** (рис. 5.21) або **клинчастим** (рис. 5.22), у МПС загального призначення – **частково розбіжним** (рис. 5.23).

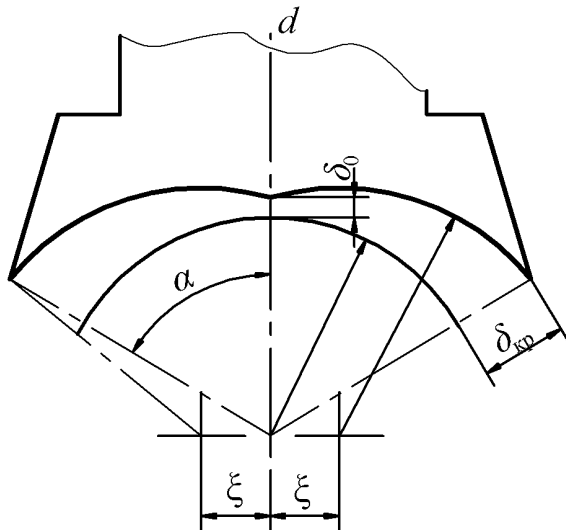


Рис. 5.22. Клинчастий повітряний зазор

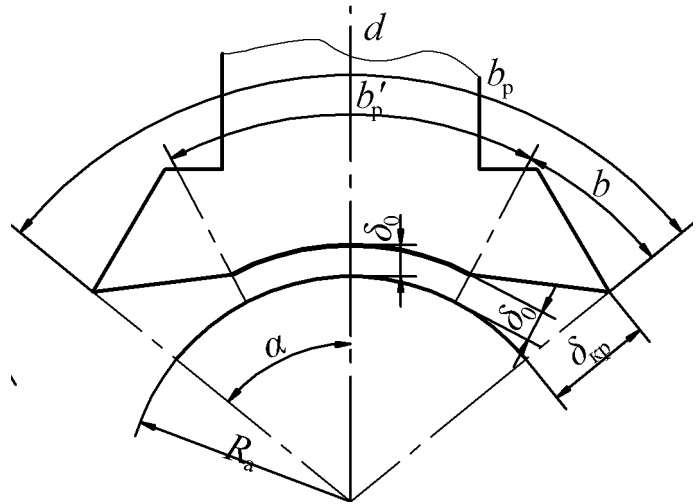


Рис. 5.23. Частково розбіжний повітряний зазор

### Визначення розрахункової величини нерівномірного зазору

Для нерівномірного повітряного зазору можна прийняти, що

$$\delta_0 = \delta_{\Gamma} / 1,5, \quad \delta_{\text{кр}} = 2\delta_{\Gamma}. \quad (5.76)$$

Величина ексцентриситету для ексцентричного зазору (рис. 5.21)

$$\xi = \frac{(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) \cdot \left[ (R_a + \delta_0) + (R_a + \delta_{\text{кр}}) \right]}{2 \left[ (R_a + \delta_0) - (R_a + \delta_{\text{кр}}) \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot \alpha_{\delta}}{2p} \right) \right]} \quad (5.77)$$

і для клинчастої конфігурації зазору (рис. 5.22)

$$\xi = \frac{(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) \cdot \left[ (R_a + \delta_0) + (R_a + \delta_{\text{кр}}) \right]}{2 \left[ (R_a + \delta_{\text{кр}}) \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot \alpha_{\delta}}{2p} \right) \right]}. \quad (5.78)$$

Дійсна ширина полюсного наконечника для частково розбіжного зазору (рис. 5.23)

$$b_p = b_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau. \quad (5.79)$$

Величина скосу полюсного наконечника при частково розбіжному

зазори (рис. 5.23)

$$b = R_a \cdot \arccos \left( \frac{R_a + \delta_0}{R_a + \delta_{кр}} \right). \quad (5.80)$$

Полюсна дуга, яка припадає на рівномірну частину частково розбіжного зазору (рис. 5.23),

$$b'_p \approx b_p - 2b. \quad (5.81)$$

Розрахункова величина нерівномірного повітряного зазору під головним полюсом

$$\delta_{еф} = k_{еф} \cdot \delta_0. \quad (5.82)$$

Якщо ввести позначення

$$C_\delta = \frac{\delta_{кр}}{\delta_0} - 1, \quad (5.83)$$

то коефіцієнт  $k_{еф}$  можна розрахувати за виразами:

– ексцентричний зазор

$$k_{еф} = \frac{\sqrt{C_\delta}}{\arctg \sqrt{C_\delta}}; \quad (5.84)$$

– клинчастий зазор

$$k_{еф} = \frac{C_\delta}{\ln(C_\delta + 1)}; \quad (5.85)$$

– частково розбіжний зазор

$$k_{еф} = \frac{1}{1 - \frac{0,083 \cdot p^2}{\alpha_\delta} \cdot (\sqrt{C_\delta} - \arctg \sqrt{C_\delta})}. \quad (5.86)$$

Якщо значення  $\delta_{еф}$ , розраховане за формулою (5.82), значно відрізняється від зазору  $\delta_\Gamma$ , розрахованого за формулою (5.74), то треба скорегувати значення максимального зазору  $\delta_{кр}$ .

Спрощено розрахунковий повітряний зазор можна визначити як

$$\delta_{еф} = 0,75 \cdot \delta_0 + 0,25 \cdot \delta_{кр}. \quad (5.87)$$

Попереднє значення повітряного зазору під додатковим полюсом

$$\delta_d = (1,75 \dots 2) \delta_{еф}. \quad (5.88)$$

Величина повітряного зазору округляється до десятих часток міліметра.

### 5.9. Розрахунки розмірів магнітного кола

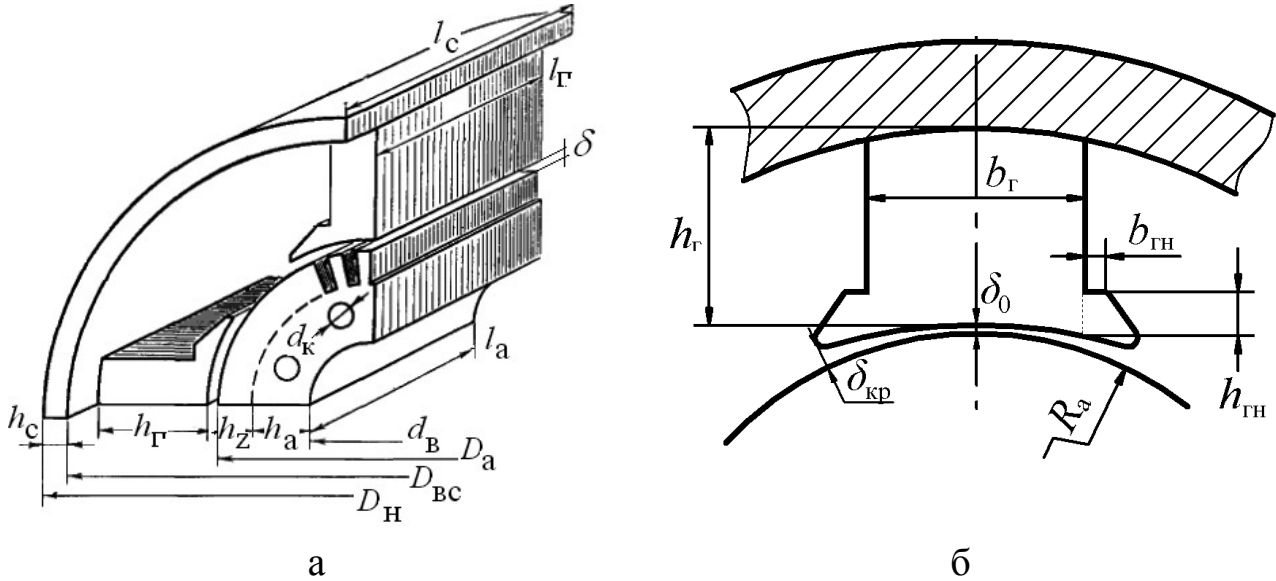


Рис 5.24. Розміри магнітного кола МПС (а) та головного полюса (б)  
**Станина**

Станина виконується з литої сталі Ст3 з граничним значенням індукції  $B_c = 1,3 \text{ Тл}$ .

Розрахункова довжина станини, мм,

$$l_c = l_a + k_{\text{СТ}} \cdot \tau, \quad (5.89)$$

де  $k_{\text{СТ}} \approx 0,5$  при  $2p = 2$  та  $k_{\text{СТ}} \approx 0,65$  при  $2p = 4$ .

Товщина станини, мм,

$$h_c = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2l_c \cdot B_c} = \frac{B_{\delta}}{B_c} \cdot \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{2l_c}. \quad (5.90)$$

#### Головний полюс

Осердя головного полюсу (рис. 5.24,б) збирається з листів холоднокатаної анізотропної сталі марок 3411, 3412, 3413 завтовшки 1 мм.

Для МПС захищеного виконання (IC22) із самовентиляцією (IC01) магнітна індукція в осерді дорівнює  $B_{\Gamma} = (1,6 \dots 1,7) \text{ Тл}$ .

При виконанні МПС за ступенем захисту IP44 і способом охолодження IC0141 або IC0041 індукція  $B_{\Gamma}$  повинна бути знижена на  $(0,2 \dots 0,3) \text{ Тл}$ .

Довжина осердя полюса (рис. 5.24,б), мм,

$$l_{\Gamma} = l_a. \quad (5.91)$$

Ширина осердя (рис. 5.24,б), мм,

$$b_{\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \Phi_{\delta} \cdot 10^6}{\kappa_{\text{сГ}} \cdot l_{\Gamma} \cdot B_{\Gamma}} = \frac{B_{\delta}}{B_{\Gamma}} \cdot \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\kappa_{\text{сГ}} \cdot l_{\Gamma}}, \quad (5.92)$$

де  $\sigma_{\Gamma} = (1,15 \dots 1,25)$  – коефіцієнт розсіяння головного полюса;

$\sigma_{\Gamma} = 1,15$  для МПС з  $2p = 2$ ,  $\sigma_{\Gamma} = 1,2$  для МПС з  $2p = 4$ ;

$\kappa_{\text{сГ}} = (0,96 \dots 0,98)$  – коефіцієнт заповнення осердя полюса сталлю.

Висота головного полюса, мм,

$$h_{\Gamma} = \frac{D_{\text{Н}} - 2h_{\text{с}} - D_a - 2\delta_0}{2}, \quad (5.93)$$

де  $D_{\text{Н}}$  – зовнішній діаметр машини, мм;

$h_{\text{с}}$  – товщина станини (5.90), мм.

Ширина виступу головного полюса, мм,

$$b_{\Gamma\text{Н}} \approx (0,1 \dots 0,14)b_{\Gamma}. \quad (5.94)$$

Висота виступу полюсного наконечника, мм,

$$h_{\Gamma\text{Н}} = 0,6 \cdot (b_{\text{р}} - b_{\Gamma}) \cdot \frac{B_{\delta}}{B_{\Gamma}}, \quad (5.95)$$

де  $b_{\text{р}}$  – дійсна довжина полюсної дуги, мм.

### Спинка якоря

Якір набирається з листів ізотропної холоднокатаної електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм таких марок (табл. 5.20).

Таблиця 5.20

Марки холоднокатаної електротехнічної сталі

Висота осі обертання, мм	80...200	225...315	355...500
Марка сталі	2013	2312	2411

При діаметрах розточки  $D_a > 200$  мм якір виконують з аксіальними вентиляційними каналами відповідно до табл. 5.21.

Таблиця 5.21

Розміри аксіальних вентиляційних каналів

Діаметр якоря, мм	225	250	280	315	355	400	450	500
Число рядів каналів $n_{\text{ка}}$	1	1	2	2	2	2	2	2
Діаметр каналу $d_{\text{ка}}$ , мм	15	16	18	20	23	26	29	32
Кількість каналів	17	19	21	23	26	30	34	38

Діаметр вала орієнтовно, мм,

$$d_{\text{в}} \approx c_{\text{в}} \cdot \sqrt[3]{P_{\text{н}}/n_{\text{н}}}, \quad (5.96)$$

де  $P_{\text{н}}$  – номінальна потужність, кВт;  $c_{\text{в}}$  – за табл. 5.22.

Висота спинки якоря за відсутності аксіальних каналів, мм,

$$h_{\text{ж}} = 0,5(D_{\text{а}} - d_{\text{в}}) - h_{\text{п}}. \quad (5.97)$$

Висота спинки якоря за наявності аксіальних каналів, мм,

$$h_{\text{ж}} = 0,5(D_{\text{а}} - d_{\text{в}}) - h_{\text{п}} - \frac{2}{3} \cdot n_{\text{ка}} \cdot d_{\text{ка}}. \quad (5.98)$$

Таблиця 5.22

Значення коефіцієнта  $c_{\text{в}}$

$D_{\text{а}}$ , мм	100	200	300	400	500
$c_{\text{в}}$	320	270	245	230	215

Індукція в спинці якоря, Тл

$$B_{\text{ж}} = B_{\delta} \cdot \frac{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{2h_{\text{ж}} \cdot l_{\text{ст}} \cdot k_{\text{с}}}. \quad (5.99)$$

Індукція в спинці якоря не повинна перевищувати значень табл. 5.23

Таблиця 5.23

Граничні значення  $B_{\text{ж}}$

$f_{\text{пер}}$ , Гц	< 50	50–100
$2p = 2$	1,65 Тл	1,6 Тл
$2p = 4$	1,45 Тл	1,4 Тл

При виконанні МПС за ступенем захисту IP44 і способом охолодження IC0141 значення індукції  $B_{\text{ж}}$  повинне бути знижене на 0,2 Тл.

Якщо значення індукція в спинці перевищує рекомендовані значення,

то слід зменшити висоту паза якоря ( $h_{II}$ ).

### 5.10. Розрахунок магнітного кола

Структура магнітного кола наведена на рис. 5.25.

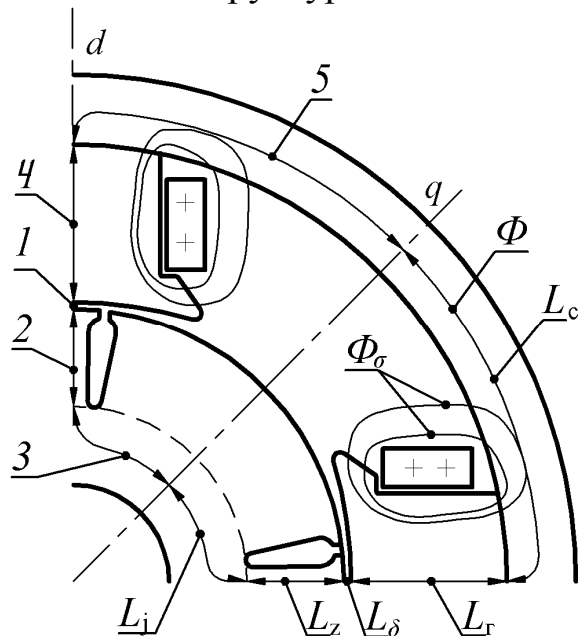


Рис. 5.25.

Ескіз магнітного кола:

1 – повітряний зазор;

2 – зубці якоря;

3 – спинка якоря;

4 – головний полюс;

5 – станина

#### Повітряний зазор

МРС повітряного зазору,  $A$ ,

$$F_{\delta} = H_{\delta} \cdot L_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^3, \quad (5.100)$$

де  $\delta$  – еквівалентний повітряний зазор,  $mm$ ;

$k_{\delta}$  – коефіцієнт повітряного зазору.

У загальному випадку

$$k_{\delta} = k_{\delta a} \cdot k_{\delta k} \cdot k_{\delta \sigma} \cdot k_{\delta b}. \quad (5.101)$$

Тут  $k_{\delta a}$  враховує наявність зубців на якорі

$$k_{\delta a} = 1 + \frac{b_{III}}{t_1 - b_{III} + 5 \frac{\delta \cdot t_1}{b_{III}}}, \quad (5.102)$$

де  $t_1, b_{III}$  – зубцевий розподіл і відкриття паза якоря,  $mm$ .

При прямокутних пазах на якорі замість  $b_{III}$  підставляється  $b_{II}$ ,  $mm$ .

$k_{\delta k}$  враховує вплив пазів КО в полюсному наконечнику головного полюса на індукцію в зазорі, який аналогічний впливу пазів якоря,

$$k_{\delta_K} = 1 + \frac{b_{Ш_K}}{t_K - b_{Ш_K} + 5 \frac{\delta \cdot t_K}{b_{Ш_K}}}, \quad (5.103)$$

де  $t_K$ ,  $b_{Ш_K}$  – зубцевий розподіл полюсного наконечника головного полюса і відкриття паза КО, мм.

*Для некомпенсованих МПС  $k_{\delta_K} = 1$ .*

$k_{\delta\delta}$  враховує наявність бандажних канавок при кріпленні ОЯ бандажами. У МПС з висотою осі обертання до  $h_0 \leq 200$  мм застосовуються склобандажі, при  $h_0 > 200$  мм – дровові бандажі. Остаточо питання вибору матеріалу бандажа вирішується при механічних розрахунках бандажів (розд. 10).

При бандажах з немагнітного матеріалу

$$k_{\delta\delta} = 1 + \frac{(n_{\delta} \cdot b_{\delta}) \cdot h_{\delta}}{l_a \cdot (\delta + h_{\delta}) - (n_{\delta} \cdot b_{\delta}) \cdot h_{\delta}}. \quad (5.104)$$



При бандажах з магнітного дроту

$$k_{\delta\sigma} = 1 + \frac{(n_{\sigma} \cdot b_{\sigma}) \cdot (h_{\sigma} + 0,8d_{\sigma})}{l_a \cdot (\delta + h_{\sigma} - 0,8d_{\sigma}) - (n_{\sigma} \cdot b_{\sigma}) \cdot (h_{\sigma} - 0,8d_{\sigma})}. \quad (5.105)$$

Тут  $n_{\sigma}$  – кількість бандажних канавок ( $n_{\sigma} = 2 \dots 4$ );

$b_{\sigma}$  – ширина бандажної канавки, мм;

$h_{\sigma}$  – глибина бандажної канавки, мм;

$d_{\sigma}$  – діаметр бандажного дроту (мм) за табл. 5.24.

Таблиця 5.24

Розміри бандажної канавки та дроту

$h_0$ , мм	$\leq 225$	225...315	$> 315$
$h_{\sigma}$ , мм	2	3	3,5
$d_{\sigma}$ , мм	1	1,5	2
$b_{\sigma}$ , мм	15	20	25

У МПС першої довжини ( $M$ ) довжина бандажних канавок ( $n_{\sigma} \cdot b_{\sigma}$ )  $\approx 0,35l_a$ , другої довжини ( $L$ ) – ( $n_{\sigma} \cdot b_{\sigma}$ )  $\approx 0,25l_a$ .

Якщо при розрахунку бандажа з немагнітного матеріалу за формулою (5.104) значення  $k_{\delta\sigma} > 1,4$ , необхідно прийняти бандаж з проволочки за формулою (5.105).

**При кріпленні ОЯ клинами  $k_{\delta\sigma} = 1$ .**

$k_{\delta\sigma}$  враховує наявність радіальних вентиляційних каналів при пакуванні якоря

$$k_{\delta\sigma} = 1 + \frac{3\delta}{l_{\text{пак}} + 3\delta \cdot \left(1 + \frac{l_{\text{пак}}}{b_{\text{вк}}}\right)}, \quad (5.106)$$

де  $l_{\text{пак}}$  – довжина пакета;

$b_{\text{вк}}$  – ширина радіального вентиляційного каналу ( $b_{\text{вк}} = 10$  мм).

**За відсутності радіальних каналів  $k_{\delta\sigma} = 1$ .**

Кількість складових коефіцієнта повітряного зазору в формулі (5.101) визначається структурою магнітного кола машини.

### Зубцева зона якоря

У випадку прямокутного відкритого паза зубець має трапецеїдальну форму (рис. 5.26).

При цьому розглядаються три перерізи зубця з розмірами:

- мінімальний  $b_{z3} = b_{z_{\min}}$  ;
- максимальний  $b_{z1} = b_{z_{\max}}$  ;
- середній  $b_{z2} = b_{z_{\text{сер}}}$  .

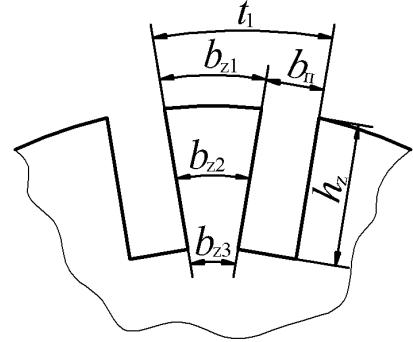


Рис. 5.26. Зубцева зона якоря

Ширина зубця в розглянутих перерізах, мм,

$$b_{z1} = t_1 - b_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{а}}}{Z} - b_{\text{п}}; \quad (5.107)$$

$$b_{z2} = t_2 - b_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{а}} - h_{\text{п}})}{Z} - b_{\text{п}}; \quad (5.108)$$

$$b_{z3} = t_3 - b_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{а}} - 2h_{\text{п}})}{Z} - b_{\text{п}}. \quad (5.109)$$

Розрахункове (фіктивне) значення магнітної індукції в довільному перерізі зубця завширшки  $b_{zx}$

$$B'_{zx} = B_{\delta} \cdot \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{zx} \cdot l_{\text{СТ}} \cdot \kappa_{\text{С}}}. \quad (5.110)$$

Якщо розрахункове значення індукції  $B'_{zx} \leq 1,8 \text{ Тл}$ , то напруженість магнітного поля в цьому перерізі  $H_{zx}$  визначається за таблицями Додатка А (табл. А.1...А.3) для основної кривої намагнічування відповідної марки сталі.

У випадку якщо  $B'_{zx} > 1,8 \text{ Тл}$ , вважається, що зубець насичується й частина магнітного потоку замикається через паз. Можна записати, що

$$\Phi'_{zx} = \Phi_{zx_{\text{д}}} + \Phi_{\text{пх}}, \text{ звідки } B'_{zx} = B_{zx_{\text{д}}} + B_{\text{пх}} \cdot \frac{S_{\text{пх}}}{S_{zx}}, \text{ де } B_{zx_{\text{д}}} - \text{дійсна інду-}$$

кція в розглянутому перерізі зубця. Для індукції в зубцях можна записати рівняння

$$B'_{zx} = B_{zx_{\text{д}}} + \mu_0 \cdot H_{\text{пх}} \cdot \frac{S_{\text{пх}}}{S_{zx}}.$$

Значення  $H_{zx_d}$  може бути знайдене шляхом розв'язання рівняння

$$B'_{zx} = B_{zx_d} + \mu_0 \cdot H_{zx_d} \cdot k_{пх},$$

де

$$k_{пх} = \frac{S_{пх}}{S_{zx}} = \frac{b_{пх} \cdot l_{\delta}}{b_{zx} \cdot k_c \cdot l_{ст}}. \quad (5.111)$$

Більш зручним способом знаходження  $H_{zx_d}$  є графічний метод, для чого будується залежність  $B = f(H)$  заданої марки сталі та проводиться пряма лінія  $\mu_0 \cdot H_z \cdot k_{пх}$ , яка розраховується для довільного значення  $H_z$  (рис. 5.27). Через точку 1 на осі ординат, яка відповідає розрахунковому значенню індукції в зубці  $B'_{zx}$ , проводиться пряма, паралельна лінії, що проходить через початок координат і точку з індукцією  $\mu_0 \cdot H_z \cdot k_{пх}$ .

Точка 2 дає значення дійсної індукції в розглянутому перерізі зубця  $B_{zx_d}$  і напруженості магнітного поля  $H_{zx_d}$ .

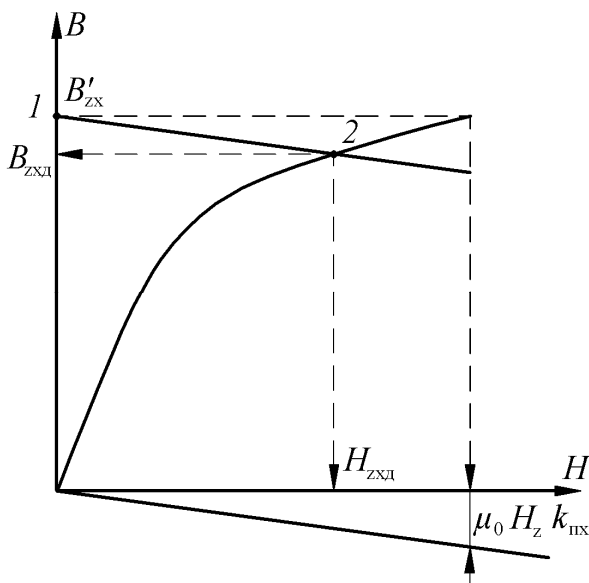


Рис. 5.27. До розрахунку  $H_{zx_d}$

Значення напруженості  $H_{zx_d}$

також можна визначити за залежностями  $B_{zx} = \varphi(H_{zx}, k_{пх})$  на рис. А.1, А.2 Додатка А.

Якщо виконати розрахунки  $H_{zx}$  для трьох (рис. 5.26) перерізів зубця, то напруженість магнітного поля в зубці за формулою Сімпсона, А/м,

$$H_z = \frac{1}{6} \cdot \left[ H_{z_{max}} + H_{z_{min}} + 4 \cdot H_{z_{сер}} \right]. \quad (5.112)$$

МРС зубцевого шару, А,

$$F_z = H_z \cdot L_z = H_z \cdot h_z \cdot 10^{-3}. \quad (5.113)$$

### Спинка якоря

Магнітна індукція в спинці якоря,  $Tл$ ,

$$B_j = \frac{\Phi}{2h_j \cdot l_{CT} \cdot k_c} \cdot 10^6. \quad (5.114)$$

Значення напруженості магнітного поля в спинці якоря ( $H_a$ ,  $A/m$ ) визначається за основною кривою намагнічування марки сталі, що використовується (табл. А.1...А.3 Додатка А).

Довжина магнітної силової лінії в спинці якоря,  $мм$ ,

$$L_j = \frac{\pi}{4p} (d_B + h_j) + \frac{h_j}{2}. \quad (5.115)$$

МРС спинки якоря,  $A$ ,

$$F_j = H_j \cdot L_j \cdot 10^{-3}. \quad (5.116)$$

### Головний полюс

Магнітна індукція в осерді головного полюса,  $Tл$ ,

$$B_\Gamma = \frac{\sigma_\Gamma \cdot \Phi}{b_\Gamma \cdot l_\Gamma \cdot k_{c\Gamma}} \cdot 10^6, \quad (5.117)$$

де  $k_{c\Gamma} = (0,96...0,98)$  – коефіцієнт заповнення пакета полюса сталлю;

$\sigma_\Gamma = (1,15...1,25)$  – коефіцієнт розсіяння головного полюса.

Значення напруженості магнітного поля в осерді головного полюса ( $H_\Gamma$ ,  $A/m$ ) визначається за кривою намагнічування марки сталі головного полюса (табл. А.4...А.5 Додатка А).

Розрахункова довжина магнітної силової лінії в головному полюсі,  $мм$ :

– для компенсованих МПС

$$L_\Gamma = h_\Gamma - h_{ZK}; \quad (5.118)$$

– для некомпенсованих МПС

$$L_\Gamma = h_\Gamma; \quad (5.119)$$

МРС осердя головного полюса,  $A$ ,

$$F_{\Gamma} = H_{\Gamma} \cdot L_{\Gamma} \cdot 10^{-3}. \quad (5.120)$$

### **Зубцева зона полюсного наконечника**

Довжина дуги полюсного наконечника

$$b_p = \alpha_{\delta} \cdot \tau - 2\delta_{\Gamma}. \quad (5.121)$$

Довжина дуги полюсного наконечника на відстані 1/3 від основи зубця КО

$$b_{p(1/3)} = b_p \left( 1 + \frac{2h_{\text{ЗК}}}{3(D_a + 2\delta)} \right). \quad (5.122)$$

Магнітна індукція в перерізі зубця КО на висоті 1/3 від основи зубця, Тл,

$$B_{\text{ЗК}} = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \Phi \cdot 10^6}{l_{\Gamma} \cdot k_{\text{сГ}} \cdot (b_{p(1/3)} - Z_{\text{К}} \cdot b_{\text{ПК}})}. \quad (5.123)$$

Для МПС з компенсаційною обмоткою  $\sigma_{\Gamma} = 1,25$ .

Значення напруженості магнітного поля в зубцях головного полюса ( $H_{\text{ЗК}}$ , А/м) визначається за кривою намагнічування використовуваної марки сталі (Додаток А).

МРС зубцевого шару полюсного наконечника, А,

$$F_{\text{ЗК}} = H_{\text{ЗК}} \cdot h_{\text{ЗК}} \cdot 10^{-3}. \quad (5.124)$$

### **Зазор між головним полюсом і станиною**

Повітряний зазор, що враховує нещільне прилягання осердя головного полюса до станини, мм,

$$\delta_{\text{ГС}} = 2l_{\Gamma} \cdot 10^{-4} + 0,1. \quad (5.125)$$

МРС зазору між головним полюсом і станиною, А,

$$F_{\delta_{\text{ГС}}} = 0,8 \cdot B_{\Gamma} \cdot \delta_{\text{ГС}} \cdot 10^3. \quad (5.126)$$

### **Станина**

Розрахункова довжина магнітної силової лінії в станині, мм,

$$L_{\text{С}} = \frac{\pi}{4p} (D_{\text{Н}} - h_{\text{С}}) + \frac{h_{\text{С}}}{2}, \quad (5.127)$$

Магнітна індукція в станині, Тл,

$$B_c = \frac{\sigma_\Gamma \cdot \Phi}{2h_c \cdot l_c} \cdot 10^6. \quad (5.128)$$

Значення напруженості магнітного поля в станині ( $H_c, A/m$ ) визначається за кривою намагнічування для масивних станин (табл. А.6 Додатка А).

МРС станини,  $A$ ,

$$F_c = H_c \cdot L_c \cdot 10^{-3}. \quad (5.129)$$

### **Розрахунок сумарної МРС**

Магніторушійна сила всіх ділянок магнітного кола МПС на полюс,  $A$ ,

$$F_0 = F_\delta + F_z + F_j + F_{z_k} + F_\Gamma + F_{\delta_{гс}} + F_c. \quad (5.130)$$

Магніторушійна сила перехідного шару МПС,  $A$ ,

$$F_{\delta zj} = F_\delta + F_z + F_j. \quad (5.131)$$

Магніторушійна сила якоря на краю полюсної дуги,  $A$ ,

$$F_{ap} = 0,5 A_a \cdot b_p \cdot 10^{-3}. \quad (5.132)$$

Для забезпечення неперекидання магнітного поля під полюсом при номінальному потоці необхідно, щоб

$$\left( F_{\delta zj} / F_{ap} \right) > 1. \quad (5.133)$$

У випадку невиконання умови (5.133), тобто перекидання магнітного поля, необхідно збільшити повітряний зазор і заново виконати розрахунок магнітного кола машини.

При широкому діапазоні регулювання частоти обертання уверх від номінальної зменшенням магнітного потоку буде перекидання магнітного поля під головним полюсом. Для забезпечення при цьому сталої роботи машини в цьому режимі необхідно виконання умови

$$\left( F_{\delta zj} / F_{ap} \right) \geq 1,2. \quad (5.134)$$

Повністю характеристика намагнічування машини розраховується на ПЕОМ. За результатами розрахунків будуються характеристика намагнічування  $B_\delta = \varphi(F_0)$  і перехідна характеристика машини  $B_\delta = \varphi(F_{\delta zj})$ .

Якщо провести дотичну до початкової частини характеристики намагнічування (рис. 5.28), то одержимо залежність  $\Phi_0 = \varphi(F_\delta)$ . Ступінь насичення магнітного кола МПС характеризується коефіцієнтом насичення

$$k_{\mu} = \frac{F_0}{F_{\delta}} = 1 + \frac{F_z + F_j + F_{\Gamma} + F_{z\kappa} + F_c}{F_{\delta}} = \frac{\overline{ac}}{\overline{ab}} = 1 + \frac{\overline{bc}}{\overline{ab}}. \quad (5.135)$$

При ненасиченій магнітній системі недостатньо використовується конструктивний об'єм машини. При сильно насиченій магнітній системі зростає МРС збудження, збільшується об'єм обмотки збудження, втрати на збудження.

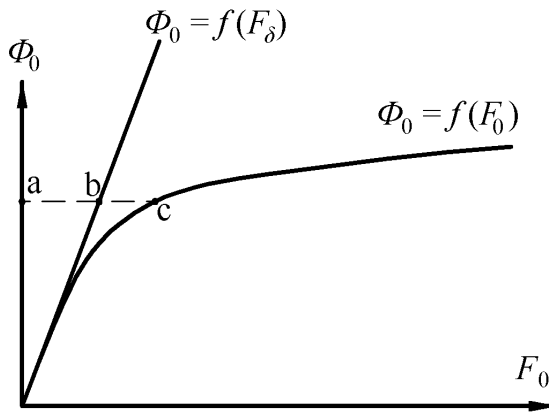


Рис. 5.28. До визначення  $k_{\mu}$

Тому робоча точка вибирається на коліні характеристики намагнічування або трохи вище (точка С на рис. 5.28).

Коефіцієнт насичення

$$k_{\mu} \approx (1,3 \dots 1,6).$$

### 5.11. Урахування дії поля якоря

На перехідній характеристиці  $B_{\delta} = \varphi(F_{\delta zj})$  магнітний потік у режимі неробочого ходу визначається [12] площею прямокутника  $ACEF$  (рис. 5.29).

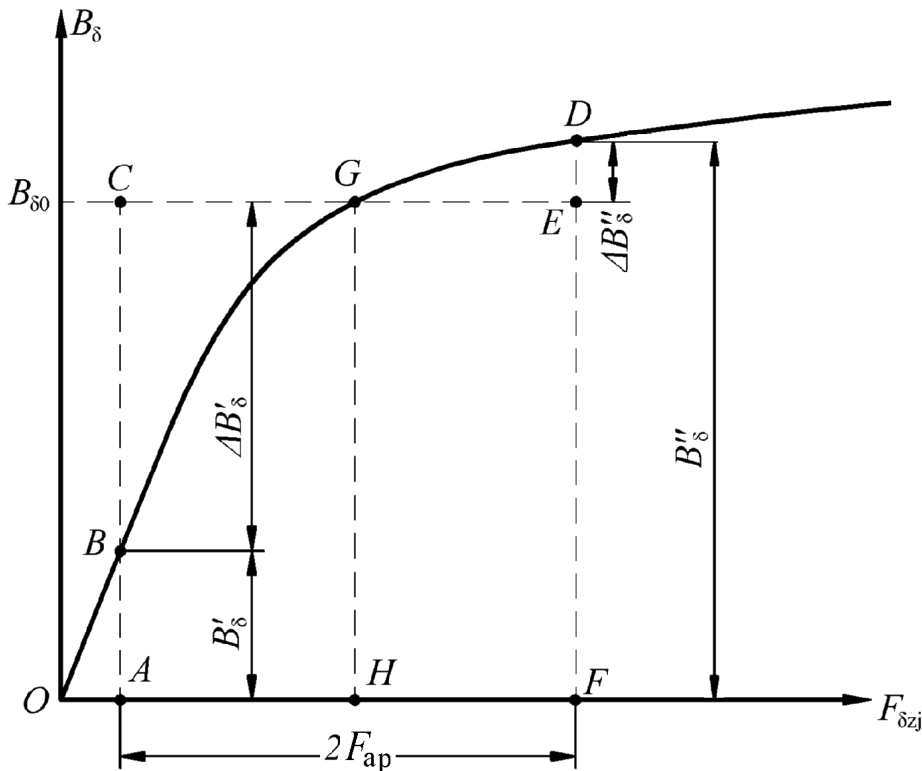


Рис. 5.29.  
Перехідна  
характеристика  
МПС

При значенні індукції в повітряному зазорі в режимі неробочого ходу  $B_{\delta_0}$  магнітний потік, Вб,

$$\Phi_0 = B_{\delta_0} \cdot b_p \cdot l_p \cdot 10^{-6}. \quad (5.136)$$

При навантаженні машини струмом  $I_a = I_{ан}$  (тобто лінійне навантаження якоря  $A_a = A_H$ ) магнітний потік визначається площею криволінійного багатокутника  $ABDF$  (рис. 5.29). Середнє значення індукції визначається за формулою Сімпсона, Тл,

$$B_{\delta_{сер}} = \frac{1}{6} [\overline{AB} + \overline{DF} + 4\overline{GF}] = \frac{1}{6} [B'_{\delta} + B''_{\delta} + 4B_{\delta_0}]. \quad (5.137)$$

При цьому зменшення магнітного потоку машини, Вб,

$$-\Delta\Phi = (B_{\delta_0} - B_{\delta_{сер}}) \cdot b_p \cdot l_p \cdot 10^{-6}. \quad (5.138)$$

Для компенсації зменшення магнітного потоку необхідно збільшити МРС обмотки збудження на величину (рис. 5.29),  $A$ ,



$$F'_{qd_H} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\overline{BC} - \overline{DE}}{\overline{BC} + \overline{DE}} \cdot 2F_{ap} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\Delta B'_\delta - \Delta B''_\delta}{\Delta B'_\delta + \Delta B''_\delta} \cdot 2F_{ap}. \quad (5.139)$$

Більш точне значення  $F_{qd_H}$  можна розрахувати, якщо на перехідній характеристиці від лінії GH (рис. 5.30), відповідній до індукції в зазорі, відкласти відрізок, рівний  $0,5 \cdot F'_{qd_H}$ . Тоді прямокутник, обумовлений МРС якоря на полюсній дузі ( $2F_{ap}$ ), займе положення  $A'C'E'F'$  на рис. 5.30.

Уточнене значення МРС, еквівалентної дії поля якоря, що розмагнічує, (рис. 5.30),  $A$ ,

$$F_{qd_H} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\overline{BC} - \overline{DE}}{\overline{B'C'} + \overline{D'E'}} \cdot 2F_{ap}. \quad (5.140)$$

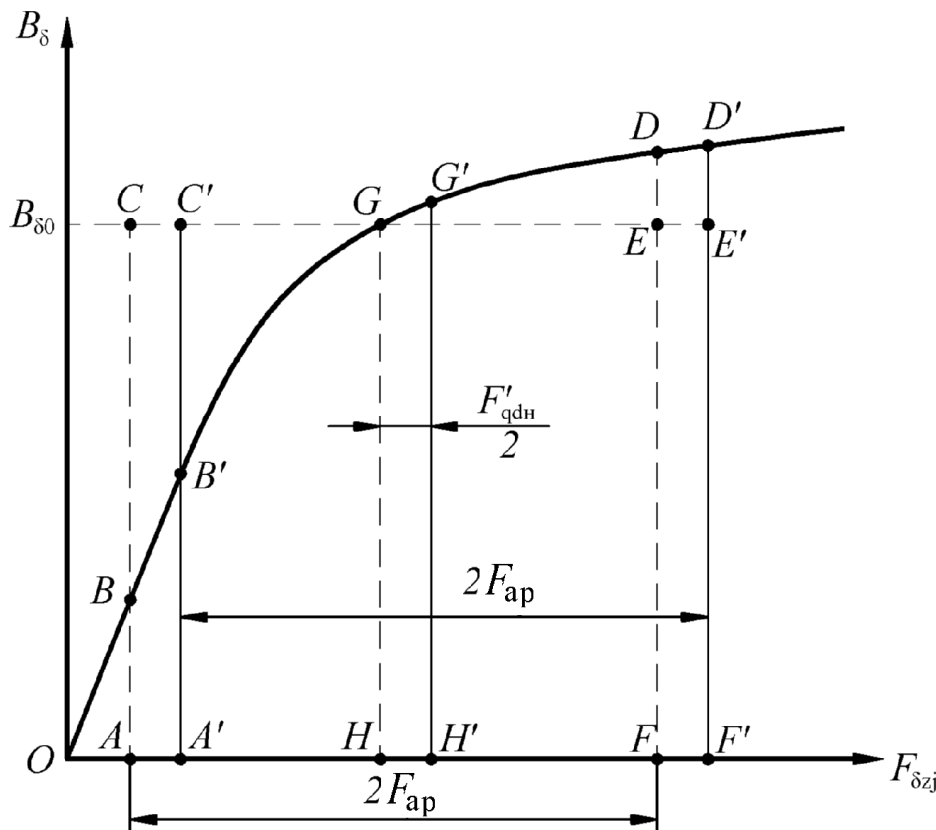


Рис. 5.30.  
До розрахунку  $F_{qd_H}$

## 5.12. Розрахунок обмоток збудження

### 5.12.1. Розрахунок МРС обмоток збудження

Для попереднього визначення МРС обмоток необхідно побудувати графік  $B_\delta = \varphi(F_0)$  за даними розрахунків характеристики неробочого хо-

ду і визначити значення  $F_{\Sigma} = F_0$ , відповідне до розрахункового значення індукції в повітряному зазорі  $B_{\delta}$ .

### ***МРС паралельного збудження***

За наявності стабілізуючої обмотки її МРС приймається рівною,  $A$ ,

$$F'_c = F_{qd_H}, \quad (5.141)$$

де  $F_{qd_H}$  – МРС, еквівалентна дії поля якоря, що розмагнічує, за формулою (5.140),  $A$ .

Число витків у котушці стабілізуючої обмотки

$$w'_c = F'_c \cdot a_c / I_{aH}, \quad (5.142)$$

де  $a_c$  – число паралельних гілок стабілізуючої обмотки, що вмикається послідовно в коло якоря. При  $I_{aH} \leq 1000 A$  –  $a_c = 1$ , якщо  $I_{aH} > 1000 A$  –  $a_c = 2$ .

Число витків  $w'_c$  округлюється до найближчого цілого числа  $w_c$  і МРС стабілізуючої обмотки, що вмикається послідовно в якірне коло,  $A$ ,

$$F_c = w_c \cdot I_{aH}. \quad (5.143)$$

Попереднє значення МРС паралельної обмотки збудження,  $A$ ,

$$F'_{ш} = F_{\Sigma} + F_{qd_H} - F_c. \quad (5.144)$$

### ***МРС послідовного збудження***

Попереднє значення МРС обмотки послідовного збудження,  $A$ ,

$$F'_c = F_{\Sigma} + F_{qd_H}. \quad (5.145)$$

Число витків у котушці й МРС обмотки послідовного збудження розраховуються за (5.142), (5.143).

### ***МРС змішаного збудження***

$$F_{\text{C}} + F_{\text{Ш}} = F_{\Sigma} + F_{\text{q}d_{\text{H}}} \quad (5.146)$$

При підстановці до рівняння (5.146) заданого у вхідних даних на проектування співвідношення  $k_{\text{СШ}} = F_{\text{C}}/F_{\text{Ш}}$ , попереднє значення МРС паралельної обмотки збудження,  $A$ ,

$$F'_{\text{Ш}} = \frac{F_{\Sigma} + F_{\text{q}d_{\text{H}}}}{1 + k_{\text{СШ}}} \quad (5.147)$$

Попереднє значення МРС послідовної обмотки збудження,  $A$ ,

$$F'_{\text{C}} = k_{\text{СШ}} \cdot F'_{\text{Ш}} \quad (5.148)$$

Число витків у котушці послідовної обмотки і МРС послідовної обмотки збудження розраховуються за (5.142), (5.143).

#### ***МРС незалежного збудження***

$$F'_{\text{H}} = F_{\Sigma} + F_{\text{q}d_{\text{H}}} \quad (5.149)$$

### ***5.12.2. Розрахунки опору обмоток збудження***

#### ***Обмотки паралельного і незалежного збудження***

Попереднє значення площі поперечного перерізу провідника обмоток,  $\text{мм}^2$ ,

$$q'_{\text{Ш(Н)}} = 1,05 \frac{2p \cdot F'_{\text{Ш(Н)}} \cdot \rho_{\text{Cu}} \cdot l_{\text{ВШ(Н)}}}{U_3} \cdot 10^3, \quad (5.150)$$

де  $\rho_{\text{Cu}}$  – питомий електричний опір міді при розрахунковій температурі (табл. 5.17),  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ .

При паралельному збудженні  $U_3 = U_{\text{a}}$ , при незалежному збудженні  $U_3$  – напруга на обмотці збудження,  $\text{В}$ .

Остаточне значення розмірів круглого провідника ОЗ ( $q_{\text{Ш(Н)}}$ ,  $d_{\text{Ш(Н) гол}}$ ,  $d_{\text{Ш(Н) із}}$ ) вибирається з Додатка Б.

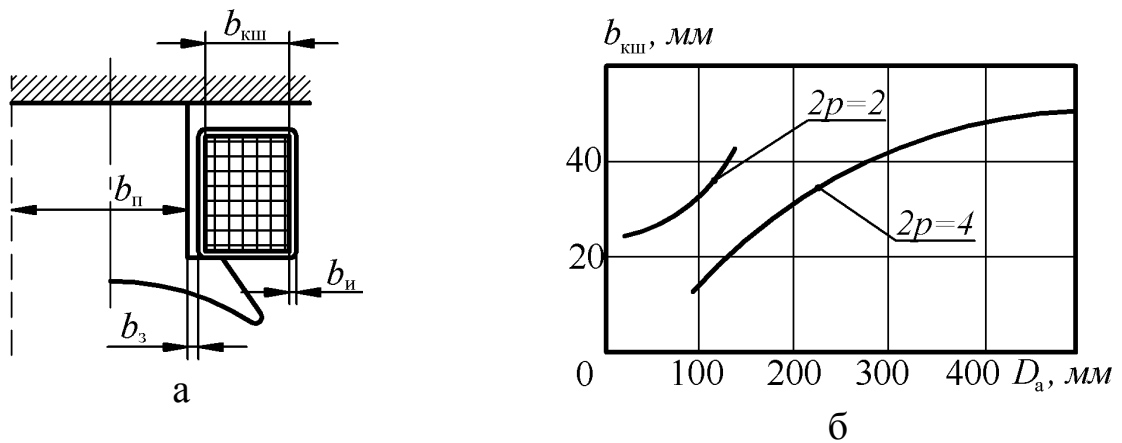


Рис 5.31. До визначення розмірів котушки головного полюса

Середня довжина витка обмотки збудження, мм,

$$l_{вш(н)} = 2(l_{Г} + b_{Г}) + \pi(b_{кш} + 2b_1 + 2b_3 + 2b_{к}), \quad (5.151)$$

де  $b_{кш}$  – ширина котушки (рис. 5.31,б), мм;

$b_1$  – товщина ізоляції котушки (табл. 5.29), мм;

$b_3 = (0,5 \dots 0,8)$  мм – однобічний зазор між полюсом і котушкою;

$b_{к} = (0,5 \dots 1)$  мм – товщина каркаса.

Попередньо густина струму в обмотках головних полюсів ( $j_{ш(н)}$ ) приймається за рис. 5.32.

Число витків у котушці ОЗ

$$w'_{ш(н)} = \frac{F'_{ш(н)}}{j_{ш(н)} \cdot q_{ш(н)}}. \quad (5.152)$$

Число витків  $w'_{ш(н)}$  округлюється до найближчого цілого числа  $w_{ш(н)}$ .

Опір обмотки, Ом,

$$r_{ш(н)} = \rho_{сц} \cdot \frac{2p \cdot w_{ш(н)} \cdot l_{вш(н)}}{q_{ш(н)}} \cdot 10^3. \quad (5.153)$$

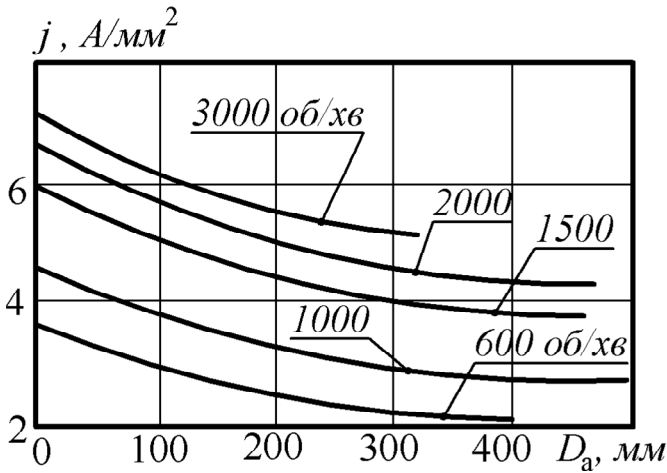


Рис. 5.32. Густина струму в обмотках головних полюсів

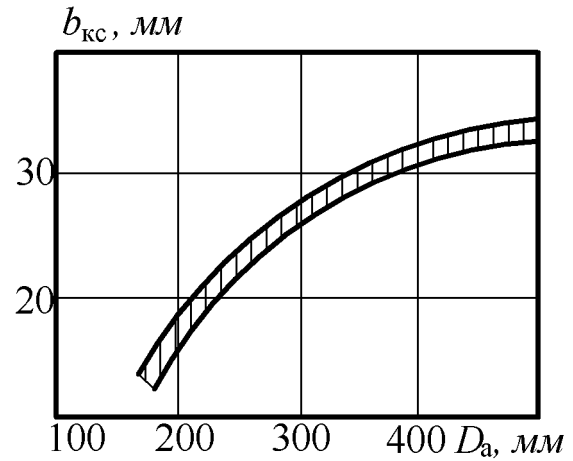


Рис. 5.33. Ширина  $b_{кc}$  полюсної котушки з голої шинної міді

МРС обмотки паралельного (незалежного) збудження,  $A$ ,

$$F_{ш(н)} = w_{ш(н)} \cdot J_{ш(н)} \cdot q_{ш(н)}. \quad (5.154)$$

### Обмотка послідовного збудження (стабілізуюча)

Попереднє значення перерізу проводу обмотки,  $мм^2$ ,

$$q'_c = I_{ан} / (a_c \cdot j'_c), \quad (5.155)$$

де  $a_c$  – число паралельних гілок обмотки, що вмикається послідовно в коло якоря. При  $I_a \leq 1000 A$  –  $a_c = 1$ , якщо  $I_a > 1000 A$  –  $a_c = 2$ ;

$j'_c$  – попереднє значення густини струму в обмотці за рис. 5.32,  $A/мм^2$ .

Структура стабілізуючої та послідовної обмоток приймається за рис. 5.43 аналогічною обмотці додаткових полюсів. З метою уніфікації провідники стабілізуючої та послідовної обмоток збудження доцільно виконати таким самим проводом, яким виконана обмотка додаткових полюсів (рис. 5.43).

Після вибору проводу обмотки ( $q_c, b_{пр}, a_{пр}$ ) уточнюється значення густини струму  $j_c$  з формули (5.155).

Середня довжина витка обмотки,  $мм$ ,

$$l_{вс} = 2(l_{Г} + b_{Г}) + \pi(b_{кc} + 2r), \quad (5.156)$$

де  $l_{Г}, b_{Г}$  – довжина і ширина головного полюса,  $мм$ ;

$b_{\text{КС}}$  – ширина котушки (мм) за рис. 5.31, 5.33;

$r \geq 0,05 \cdot \frac{b_{\text{пр}}^2}{a_{\text{пр}}}$  – радіус закруглення мідного проводу при співвідно-

шенні більшої ( $b_{\text{пр}}$ ) та меншої ( $a_{\text{пр}}$ ) сторін проводу, мм.

Опір обмотки, що вмикається послідовно в коло якоря, Ом,

$$r_c = \rho_{\text{Cu}} \cdot \frac{2p \cdot w_c \cdot l_{\text{BC}}}{a_c^2 \cdot q_c} \cdot 10^3. \quad (5.157)$$

Число витків у котушці ОЗ

$$w'_c = \frac{F'_c}{j_c \cdot q_c}. \quad (5.158)$$

Число витків  $w'_c$  округлюється до найближчого цілого числа  $w_c$ .

МРС обмотки послідовного збудження (стабілізуючої), розраховується за (5.143).

Розміри котушок та значення МРС обмоток збудження уточнюються в процесі розкладки обмоток у вікні машини – підрозд. 5.17.

### 5.13. Визначення розмірів щіток і колектора

Ширина щітки попередньо приймається рівною:

– прості хвильові обмотки

$$b'_{\text{Щ}} = (2 \dots 4) t_{\text{К}}; \quad (5.159)$$

– прості петльові обмотки

$$b'_{\text{Щ}} \geq (u_{\text{П}} + 0,5) t_{\text{К}}; \quad (5.160)$$

– двоходові петльові обмотки

$$b'_{\text{Щ}} > 3 t_{\text{К}}. \quad (5.161)$$

Значення  $b'_{\text{Щ}}$  округлюється до стандартного значення з ряду

$$b_{\text{Щ}} = 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32 \text{ мм}.$$

У машинах середньої потужності  $b_{\text{Щ}}$  лежить у межах (8...15) мм.

Марка щітки, спадання напруги ( $2\Delta U_{\text{Щ}}$ , В) і попереднє значення густини струму ( $j'_{\text{Щ}}$ , А/см<sup>2</sup>) у щітковому контакті приймаються за

табл. 5.25.

Контактна поверхня щіток одного бракету,  $мм^2$ ,

$$S_{щб} = \frac{I_{ан}}{\rho} \cdot \frac{1}{j'_{щ}} \cdot 10^2. \quad (5.162)$$

Повна довжина щіток одного бракету,  $мм^2$ ,

$$l_{щб} = \frac{S_{щб}}{b_{щ}}. \quad (5.163)$$

Для поліпшення роботи щіткового вузла звичайно обирають не менш від двох щіток. За значенням  $b_{щ}$  з табл. 5.26 вибирається висота ( $h_{щ}$ ) й довжина ( $l_{щ}$ ) однієї щітки з ряду

$$l_{щ} = 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40 \text{ мм.}$$

Для поліпшення ковзного контакту довжина щітки ( $l_{щ}$ ) вибирається у межах (10...25) мм.

Кількість щіток, що припадають на один щітковий болт,

$$N_{щб} = \frac{S_{щб}}{S_{щ}} = \frac{S_{щб}}{b_{щ} \cdot l_{щ}} \geq 2. \quad (5.164)$$

З урахуванням остаточних розмірів щітки ( $b_{щ}$ ,  $l_{щ}$ ,  $S_{щ}$ ,  $N_{щб}$ ) уточнюють з формули (5.162) густину струму в щітковому контакті  $j_{щ}$ .

Таблиця 5.25

Щітки для ЕМ загального призначення

Позначення марок щіток	Найменування групи марок	Перехідне спадання напруги на парі щіток, В	Густина струму, А/см <sup>2</sup>	Швидкість, м/с	Тиск на щітку, кПа	Переважна область застосування
1	2	3	4	5	6	7
Г-20	Вугільно-	2,9	15	40	50	Генератори та
Г-21		4,3	5	30	15–100	

Г-22		2,5	10	30	40	
ГЗ	Графіт-ні	1,9	11	25	20–25	
611М		2	12	40	20–25	
6110М		2	15	90	12–22	
ЭГ51		2,2	12	60	20–25	
ЭГ61		3	13	60	35–50	
ЭГ71		2,2	12	40	20–25	
ЭГ74		2,7	15	50	17–25	
ЭГ2А	Електрографітовані	2,6	10	45	20–25	Генератори та двигуни з середніми й утрудненими умовами комутації
ЭГ2АФ		2,2	15	90	15–21	
ЭГ4		2	12	40	15–20	
ЭГ8		2,4	10	40	20–40	
ЭГ14		2,5	11	40	20–40	
ЭГ74АФ		2,3	15	60	15–21	
М1	Металлографітні	1,5	15	25	15–20	Низьковольтні генератори та контактні кільця
М3		1,8	12	20	15–20	
М6		1,5	15	25	15–20	
М20		1,4	12	20	15–20	
МГ		0,2	20	20	18–23	
МГ2		0,5	20	20	18–23	
МГ4		1,1	15	20	20–25	
МГ64		0,5	25	25	15–20	
МГС0		0,2	20	20	18–23	
МГС5		2	15	35	20–25	

Таблиця 5.26

Шкала розмірів щіток  $b_{щ} \times l_{щ} \times h_{щ}$ , мм

Тангенціальний розмір $b_{щ}$	Висота щітки $h_{щ}$ при осьовому розмірі щітки $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	<b>10</b>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—



5	—	<b>12,5</b>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—	
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—	
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—	
	—	—	—	—	32	32	32	—	—	—	—	
	—	—	—	—	—	—	40	—	—	—	—	
6,3	—	—	<b>20</b>	20	20	—	—	—	—	—	—	
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—	
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—	
8	—	—	—	<b>20</b>	—	—	—	—	—	—	—	
	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	—	—	
10	—	—	—	—	<b>25</b>	25	25	—	—	—	—	
	—	—	—	—	32	32	32	32	32	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	—	
12,5					—	<b>25</b>	—	—	—	—	—	—
					—	32	32	32	32	—	—	
					—	—	40	40	40	40	—	
					—	—	—	50	50	50	50	
					—	—	—	—	—	64	64	
16					—	—	<b>32</b>	32	32	—	—	
					—	—	40	40	40	40	—	
					—	—	50	50	50	50	50	
					—	—	—	—	—	64	64	

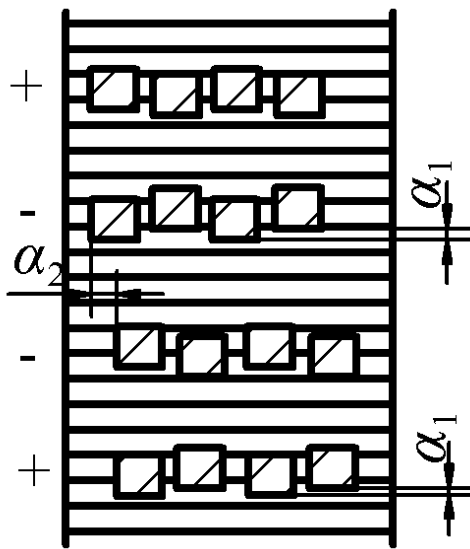
Закінчення таблиці 5.26

Тангенціальний розмір $b_{щ}$	Висота щітки $h_{щ}$ при осьовому розмірі щітки $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
20	—	—	—	—	—	—	—	<b>32</b>	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
25	—	—	—	—	—	—	—	—	<b>40</b>	40	—

	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<b>40</b>	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<b>80</b>
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Примітка. Щітки завширшки  $b_{щ} \geq 25$  мм підрозділяють на дві.

Для забезпечення рівномірного зношування поверхні колектора щітки



на бракеті розташовують у шаховому порядку зі зсувом  $\alpha_1$  (рис. 5.34). Щітки однієї половини всіх бракетів зміщають по довжині колектора на величину  $\alpha_2$ .

Швидкість на поверхні колектора, м/с,

$$g_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_H}{60} \cdot 10^{-3}. \quad (5.165)$$

Активна довжина колектора при шаховому розташуванні щіток, мм,

$$l_k = N_{щб} \cdot (l_{щ} + 8) + 10. \quad (5.166)$$

Рис. 5.34.

Розташування щіток

Ширина колекторної пластини, мм,

$$b_{кп} = t_k - b_{іп}, \quad (5.167)$$

де  $b_{іп}$  – товщина ізоляційних прокладок з міканіту між колекторними пластинами: при  $h_0 \leq 315$  мм –  $b_{іп} = 0,8$  мм, при  $h_0 > 315$  мм –  $b_{іп} = 1$  мм.

#### 5.14. Розрахунок реактивної електрорушійної сили

ЕРС само- і взаємоіндукції секцій, що комутуються, В,

$$e_c = 2 \cdot w_c \cdot \lambda_c \cdot A_a \cdot l_a \cdot g_a \cdot 10^{-9}, \quad (5.168)$$

де  $\lambda_c$  – коефіцієнт питомої магнітної провідності секції ОЯ, що комутується;

$\mathcal{G}_a$  – швидкість на поверхні якоря, м/с,

$$\mathcal{G}_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_H}{60} \cdot 10^{-3} \quad (5.169)$$

Для МПС з висотою осі обертання  $h_0 \leq 315$  мм значення  $\lambda_c$  визначається у такий спосіб:

– при овальних напівзакритих пазах якоря

$$\lambda_c = 0,6 \frac{h_{\Pi}}{2r_2} + \frac{h_{\text{Ш}}}{b_{\text{Ш}}} + \frac{l_{\text{Л}}}{l_a} + \frac{2,5 \cdot a}{w_c \cdot A_a \cdot \mathcal{G}_a \cdot l_a \cdot p} \cdot 10^8; \quad (5.170)$$

– при прямокутних відкритих пазах якоря

$$\lambda_c = 0,6 \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} + \frac{l_{\text{Л}}}{l_a} + \frac{2,5 \cdot a}{w_c \cdot A_a \cdot \mathcal{G}_a \cdot l_a \cdot p} \cdot 10^8. \quad (5.171)$$

Для МПС з висотою осі обертання  $h_0 > 315$  мм

$$\lambda_c = \frac{4u'}{2\gamma'} (\lambda_{\Pi} + \lambda_{\text{КЗ}}) + \lambda_{\text{Л}} \frac{l_{\text{Л}}}{l_a}. \quad (5.172)$$

Тут  $\gamma'$  – відносна ширина щітки

$$\gamma' = \frac{b_{\text{Ш}}}{t_{\text{К}}} + \left( 1 + \frac{a}{p} \right); \quad (5.173)$$

$4u'$  – число секцій ОЯ, що одночасно комутуються, визначається за рис. 5.35;

$\lambda_{\Pi}$  – коефіцієнт магнітної провідності розсіяння паза

$$\lambda_{\Pi} = 1,25 \frac{h_{\Pi 1}}{3b_{\Pi}} + \frac{h_{\Pi 2}}{b_{\Pi}}. \quad (5.174)$$

Розміри паза якоря визначаються за рис. 5.36.

$\lambda_{\text{КЗ}}$  – коефіцієнт магнітної провідності розсіяння по коронках зубців

$$\lambda_{\text{КЗ}} = b_{z1} / 2\delta'_d, \quad (5.175)$$

де  $\delta'_d$  – попереднє значення величини повітряного зазору під додатковим полюсом, яке для даного розрахунку можна прийняти рівним  $\delta'_d \approx (1,75 \dots 2) \delta_{\Gamma}$ ;

$\lambda_{\text{Л}}$  – коефіцієнт питомої магнітної провідності розсіяння лобових частин:

– при бандажах з магнітного дроту  $\lambda_{\text{Л}} = 0,75$ ;

– при бандажах з немагнітного дроту або скло бандажах  $\lambda_{\text{д}} = 0,5$ .

У випадку, коли довжина додаткового полюса ( $l_{\text{рд}}$ ) менша за довжину якоря ( $l_{\text{а}}$ ) (рис. 5.37), або у випадку відсутності додаткових полюсів необхідно врахувати ЕРС від дії некомпенсованого поля якоря [12],  $B$ ,

$$e_{\text{ақ}} = 2 \cdot w_{\text{с}} \cdot B_{\text{ақ}} \cdot (l_{\text{а}} - l_{\text{рд}}) \cdot \mathcal{G}_{\text{а}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.176)$$

де  $B_{\text{ақ}}$  – індукція від некомпенсованого поля якоря в зоні комутації при  $l_{\text{рд}} < l_{\text{а}}$ , Тл,

$$B_{\text{ақ}} \approx 1,25 \frac{A}{1 - \alpha_{\delta}} \cdot 10^{-6}. \quad (5.177)$$

Сумарна реактивна ЕРС,  $B$ ,

$$e_{\text{р}} = e_{\text{с}} + e_{\text{ақ}} \leq e_{\text{р доп}}, \quad (5.178)$$

де  $e_{\text{р доп}}$  приймається з табл. 5.27.

Таблиця 5.27

Припустимі значення реактивної ЕРС

$h_0, \text{мм}$	$\leq 200$	$\leq 315$	$\leq 500$
$e_{\text{р доп}}, B$	2,5...3,5	5	10...12

Наведені обмеження на значення реактивної ЕРС повинні виконуватися при **максимальній частоті обертання** ДПС, тобто

$$e_{\text{р max}} = e_{\text{р}} \cdot \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{н}}} \leq e_{\text{р доп}}. \quad (5.179)$$

Для зменшення реактивної ЕРС бажано застосовувати секції з числом витків  $w_{\text{с}} = 1$ .

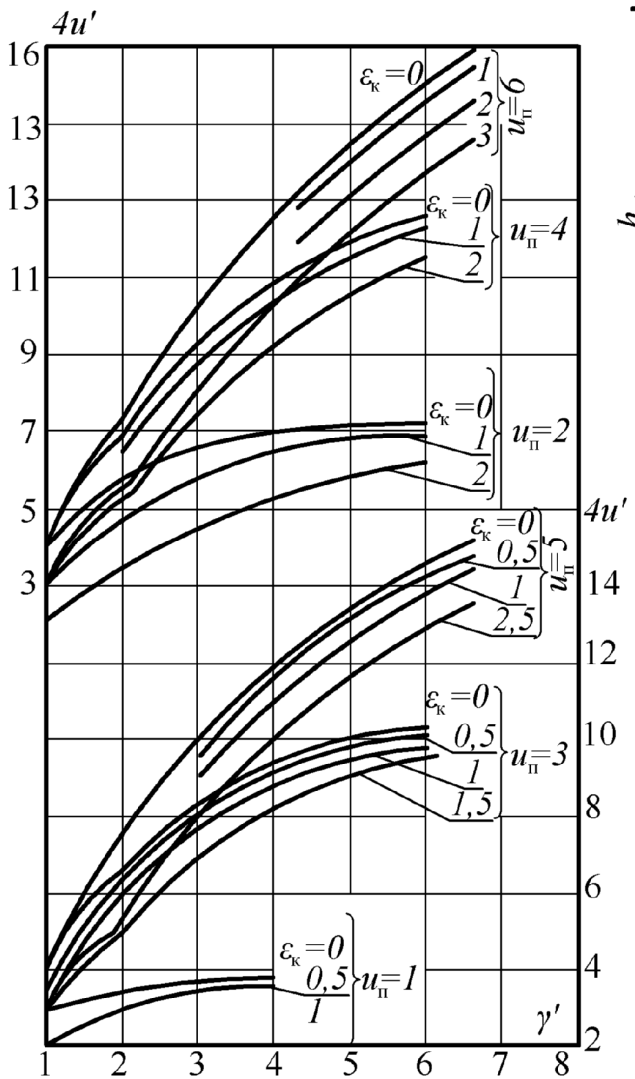


Рис. 5.35.  $4u' = f(\gamma')$

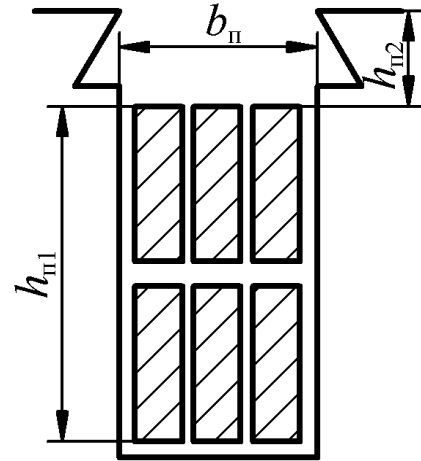


Рис. 5.36. Розміри паза якоря

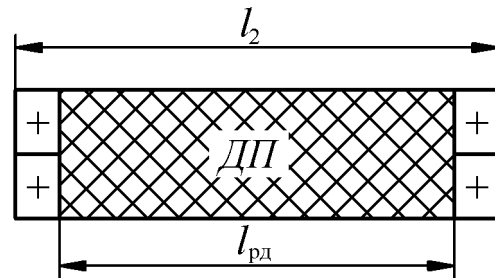


Рис. 5.37. До розрахунку  $e_{aq}$

## 5.15. РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ПОЛЮСІВ

Якщо припустити, що щітка перекриває  $\beta_{щ} = b_{щ}/t_k$  колекторних пластин, тобто  $\beta_{щ}$  секцій, що мають  $w_c$  витків кожна, перемкнуті щіткою накоротко, то можна записати [12] рівняння електричної рівноваги

$$\sum_{i=1}^n (e_k - e_c - e_{aq} - e_{тр}) = n \cdot (e_k - e_c - e_{aq} - e_{тр}) = \Delta U_{щ_{нб}} - \Delta U_{щ_{зб}}.$$

Трансформаторна ЕРС  $e_{тр} = -w_c \cdot \frac{d\Phi}{dt}$  враховується у випадку зміни магнітного потоку, що має місце в перехідних режимах і при живленні ДПС від тиристорних регуляторів напруги.

$e_c$  – реактивна ЕРС від само- і взаємоіндукції секцій, що комутуються, за формулою (5.168).

$e_{aq}$  – ЕРС від дії в зоні комутації поля якоря, що не скомпенсоване, за формулою (5.176).

$$e_k = 2 \cdot w_c \cdot B_{\delta_d} \cdot l_{рд} \cdot \mathcal{G}_a \cdot 10^{-3} \quad (5.180)$$

– ЕРС, що наводиться в замкненій накоротко секції ОЯ магнітним полем додаткового полюса з індукцією у повітряному зазорі  $B_{\delta_d}$ ,  $B$ .

### 5.15.1. Розрахунок індукції в повітряному зазорі

Рівняння електричної рівноваги з урахуванням значень складових ЕРС

$$\beta_{щ} \cdot 2 \cdot w_c \cdot \mathcal{G}_a \cdot l_{рд} \cdot 10^{-3} \cdot \left( B_{\delta_d} - \lambda_c \cdot A_a \cdot \frac{l_a}{l_{рд}} \cdot 10^{-6} - B_{aq} \cdot \frac{l_a - l_{рд}}{l_{рд}} \right) = \\ = \Delta U_{щ \text{ нб}} - \Delta U_{щ \text{ скл}}.$$

Індукція в повітряному зазорі під додатковим полюсом (ДП),  $Tл$ ,

$$B_{\delta_d} = \lambda_c \cdot A_a \frac{l_a}{l_{рд}} \cdot 10^{-6} + B_{aq} \cdot \frac{l_a - l_{рд}}{l_{рд}} + \frac{\Delta U_{щ} \cdot a \cdot 10^3}{2 \cdot p \cdot \beta_{щ} \cdot w_c \cdot \mathcal{G}_a \cdot l_{рд}} \quad (5.181)$$

або

$$B_{\delta_d} = B'_{\delta_d} + B''_{\delta_d} + B'''_{\delta_d}.$$

Тут  $\beta_{щ} = b_{щ} / (m \cdot t_k)$  – число колекторних пластин, перемкнутих щіткою;  $m$  – число ходів ОЯ.

Довжина наконечника додаткового полюса ( $l_{рд}$ ),  $мм$ ,

$D_a \leq 132 \text{ мм}$	$D_a > 132 \text{ мм}$
$l_{рд} = l_a - (8...12)$	$l_{рд} = l_a$

Спрощено значення індукції  $B_{\delta_d}$  можна визначити виходячи з величини реактивної ЕРС

$$B_{\delta_d} = k_{ПК} \cdot \frac{30 \cdot e_p}{w_c \cdot l_{рд} \cdot \pi \cdot D_a \cdot n_H} \cdot 10^6, \quad (8.182)$$

де  $k_{ПК} = (1, 1...1, 15)$  враховує необхідність забезпечення прискореної комутації.

### 5.15.2. Розрахунок зазору під додатковим полюсом

Зневажаючи МРС сталевих ділянок магнітного кола ДП, можна записати рівняння для МРС додаткового полюса

$$F_{\text{д}} = A_{\text{а}} \frac{\tau}{2} \cdot 10^{-3} - A_{\text{к}} \frac{b_{\text{р}}}{2} \cdot 10^{-3} + k_{\text{сд}} \cdot 0,8 \cdot B_{\delta_{\text{д}}} \cdot \delta_{\text{д}} \cdot k_{\delta_{\text{д}}} \cdot 10^3, \quad (5.183)$$

де  $k_{\text{сд}} = 1,15...1,25$  враховує МРС сталевих ділянок магнітного кола ДП;

$\delta_{\text{д}} \approx (2...3)\delta_{\text{еф}}$  – повітряний зазор під ДП;

$k_{\delta_{\text{д}}}$  – коефіцієнт повітряного зазору, який можна попередньо розрахувати як

$$k_{\delta_{\text{д}}} \approx \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_{\text{д}}}{t_1 - b_{\text{ш}} + 10 \cdot \delta_{\text{д}}}. \quad (5.184)$$

З метою зменшення потоку розсіяння ДП застосовують такі конструктивні заходи:

- обмотку ДП розташовують ближче до повітряного зазору між ДП і якорем;

- повітряний зазор  $\delta_{\text{д}}$  розділяють на два зазори (рис. 5.38):

- між ДП і якорем ( $\delta_{\text{да}}$ );

- між ДП і станиною ( $\delta_{\text{дс}}$ ).

При цьому

$$\delta_{\text{да}} = (0,8...0,9)\delta_{\text{д}}; \quad (5.185)$$

$$\delta_{\text{дс}} = \delta_{\text{д}} - \delta_{\text{да}}, \quad (5.186)$$

де  $\delta_{\text{еф}}$  – зазор під головним полюсом.

Число витків ОДП

$$w_{\text{д}} = F_{\text{д}} \cdot a_{\text{д}} / I_{\text{ан}} \quad (5.187)$$

округлюється до більшого цілого числа.

При струмі якоря  $I_{\text{ан}} \leq 1000 \text{ А}$  число паралельних гілок ОДП  $a_{\text{д}} = 1$ .

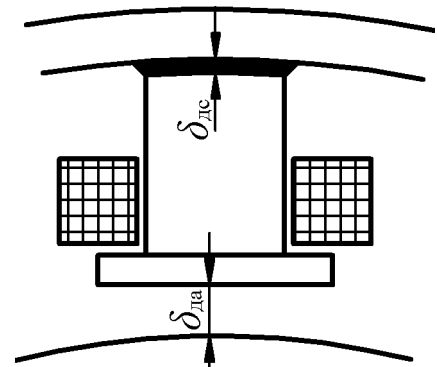


Рис. 5.38. Зазор  $\delta_{\text{д}}$

Число паралельних гілок КО та ОДП рівні –  $a_{\text{к}} = a_{\text{д}}$ .

Остаточню МРС додаткового полюса

$$F_{\text{д}} = I_{\text{ан}} \cdot w_{\text{д}} / a_{\text{д}}. \quad (5.188)$$

### 5.15.3. Розрахунок розмірів додаткових полюсів

Ширина зони комутації, мм,

$$b_{\text{кз}} = b_{\text{щ}} \cdot \frac{D_{\text{а}}}{D_{\text{к}}} + t_{\text{к}} \cdot \frac{D_{\text{а}}}{D_{\text{к}}} \cdot \left( U_{\text{п}} + \xi_{\text{к}} - \frac{a}{p} \right), \quad (5.189)$$

де  $\xi_{\text{к}}$  – укорочення обмотки якоря.

Щоб поле основних полюсів не проникало в зону комутації, необхідне виконання умови

$$\frac{b_{\text{кз}}}{(\tau - b_{\text{р}})} = (0,5 \dots 0,75).$$

Нижні значення цього відношення приймаються для МПС при діаметрах якоря  $D_{\text{а}} \geq 400$  мм, верхні границі – для МПС з  $D_{\text{а}} \leq 200$  мм. Збільшення  $b_{\text{кз}}$  призводить до збільшення потоку ДП у повітряному зазорі та до збільшення розмірів ДП.

Ширина наконечника додаткового полюса, мм,

$$b_{\text{р д}} = (0,6 \dots 0,75) \cdot b_{\text{кз}}. \quad (5.190)$$

Магнітний потік додаткового полюса в повітряному зазорі, Вб,

$$\Phi_{\text{д}} = B_{\delta_{\text{д}}} \cdot b'_{\text{р д}} \cdot l_{\text{р д}} \cdot 10^{-6}, \quad (5.191)$$

де розрахункова ширина наконечника додаткового полюса, мм,

$$b'_{\text{р д}} = b_{\text{р д}} + 2\delta_{\text{д}}. \quad (5.192)$$

Висота ДП, мм,

$$h_{\text{д}} = 0,5(D_{\text{вс}} - D_{\text{а}}) - \delta_{\text{д}}. \quad (5.193)$$

Потік розсіяння додаткового полюса, Вб,

$$\Phi_{\sigma_{\text{д}}} = 2 \cdot F_{\text{д}} \cdot l_{\text{р д}} \cdot \Lambda_{\sigma_{\text{д}}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.194)$$

де  $\Lambda_{\sigma_{\text{д}}}$  – питома магнітна провідність шляху потоку розсіяння додатково-



ГО ПОЛЮСА

$$\Lambda_{\sigma_d} = \mu_0 \cdot \lambda_{\sigma_d}. \quad (5.195)$$

Значення коефіцієнта питомої магнітної провідності  $\lambda_{\sigma_d}$  може бути розраховане [12] за ескізом вікна машини (рис. 5.39)

$$\lambda_{\sigma_d} = \frac{H'}{L'} + \frac{H''}{L''} + 0,75 \frac{H'''}{L''}. \quad (5.196)$$

Спрощено при  $2p = 4$  можна розрахувати питому магнітну провідність

$$\Lambda_{\sigma_d} \approx 2 \frac{h_d}{\tau - b_r} \cdot 10^{-6}. \quad (5.197)$$

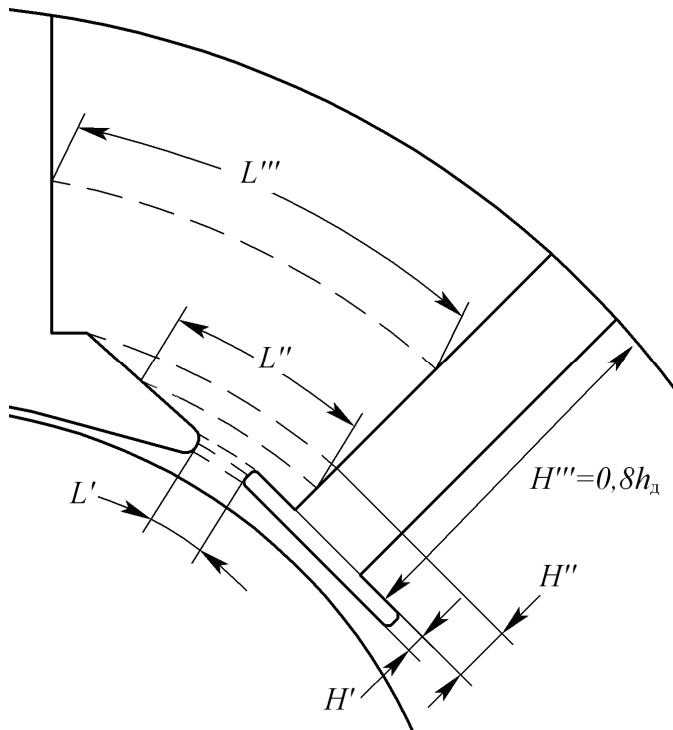


Рис. 5.39.  
До розрахунків  
 $\lambda_{\sigma_d}$

Магнітний потік у осерді додаткового полюса, Вб,

$$\Phi_{мд} = \Phi_d + \Phi_{\sigma_d}. \quad (5.198)$$

Бажано, щоб потік додаткового полюса  $\Phi_{мд}$  не перевищував (10...12) % від потоку основних полюсів.

Коефіцієнт розсіяння додаткового полюса

$$\sigma_d = \Phi_{мд} / \Phi_d. \quad (5.199)$$

МРС ДП  $F_d$  іде на компенсацію МРС якоря в комутаційній зоні  $F'_d = F_{aq}$  й створення комутуючого поля в зазорі під ДП для компенсації

реактивної ЕРС  $F_D'' = F_D - F_D'$ . Для компенсації реактивної ЕРС необхідний відносно малий корисний потік додаткового полюса (ДП). Більша частина МРС ДП витрачається на компенсацію МРС  $F_{aq}$ , тобто  $F_D' \approx (0,75 \dots 0,85)F_D$ . Тому коефіцієнт розсіяння ДП значно більший від коефіцієнта розсіяння головних полюсів.

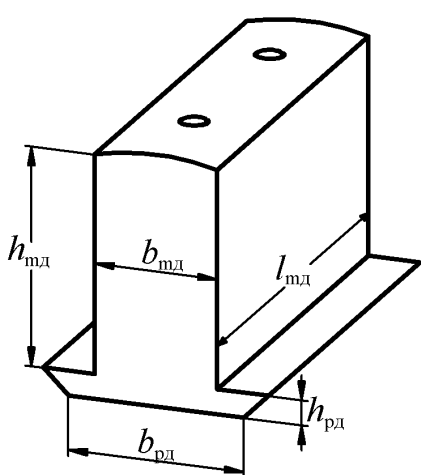
Для МПТ без КО  $\sigma_D \approx (3 \dots 3,5)$ , за наявності КО –  $\sigma_D \approx 2$ .

Індукція в осерді додаткового полюса

$$B_{мд} = B_{мд_{\max}} \cdot \frac{I_{ан}}{I_{\max}}. \quad (5.200)$$

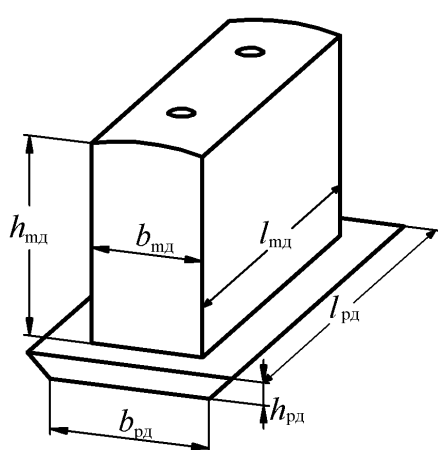
Припустиме короткочасне перевантаження для двигуна  $I_{\max}/I_{ан} = 2$ , для генератора  $I_{\max}/I_{ан} = 1,5$ . Граничне значення індукції  $B_{мд_{\max}} \leq 1,6 \text{ Тл}$ .

Таким чином, значення індукція в осерді додаткового полюса повинне бути в діапазоні  $B_{мд} = (0,8 \dots 1,0) \text{ Тл}$ .



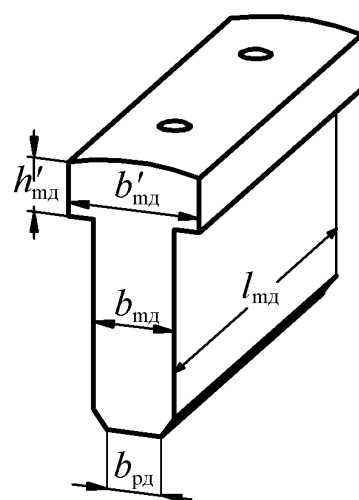
$$\begin{aligned} l_{рд} &= l_{мд} = l_a \\ h_{рд} &= (3 \dots 5) \text{ мм} \\ h_{мд} &= h_D - h_{рд} \end{aligned}$$

Рис. 5.40.



$$\begin{aligned} l_{рд} &= l_a \\ l_{мд} &= l_{рд} - (10 \dots 12) \text{ мм} \\ h_{рд} &= (3 \dots 5) \text{ мм} \\ h_{мд} &= h_D - h_{рд} \end{aligned}$$

Рис. 5.41



$$\begin{aligned} l_{рд} &= l_{мд} = l_a \\ h'_{мд} &\approx (0,3 \dots 0,35)h_D \\ b'_{мд} &\approx (1,6 \dots 2,2)b_{мд} \end{aligned}$$

Рис. 5.42

У МПС при  $h_0 \leq 132 \text{ мм}$  додатковий полюс виконується з листової сталі Ст3 (рис. 5.40), при  $h_0 \geq 160 \text{ мм}$  – з холоднокатаної анізотропної сталі марки 3411 завтовшки 1 мм (рис. 5.40). У МПС при  $h_0 \geq 355 \text{ мм}$  конструкція ДП відповідає рис. 5.42.

Площа перерізу осердя ДП,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{\text{мд}} = \Phi_{\text{мд}} \cdot 10^6 / B_{\text{мд}} \cdot \quad (5.201)$$

Ширина осердя ДП,  $\text{мм}$ ,

$$b_{\text{мд}} = S_{\text{мд}} / l_{\text{мд}} \cdot \quad (5.202)$$

Конструкції ДП наведено на рис 5.40, 5.41, 5.42.

#### 5.15.4. Розрахунок обмотки додаткових полюсів

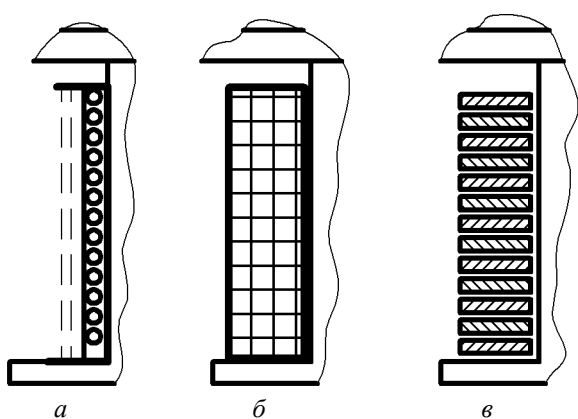
Густина струму в ОДП  $j'_\text{д} = (2,5 \dots 3,5) \text{ А} / \text{мм}^2$  при виконанні IP44 і  $j'_\text{д} = (4,5 \dots 6,5) \text{ А} / \text{мм}^2$  при виконанні IP23.

Переріз провідника ОДП,  $\text{мм}^2$ ,

$$q'_\text{д} = \frac{I_{\text{ан}}}{a_\text{д} \cdot j'_\text{д}} \cdot \quad (5.203)$$

Якщо  $q'_\text{д} \leq (8 \dots 10) \text{ мм}^2$  обмотка виконується багатошаровою з провідника круглого перерізу (рис. 5.43,а) марки ПЕТВ, ПЕТ-155, ПСД, ПСДК.

За умови  $10 < q'_\text{д} \leq 25 \text{ мм}^2$  застосовується багатошарова обмотка з прямокутного провідника (рис. 5.43,б) марки ПЕТВП, ПЕТП-155, ПСД, ПСДК зі співвідношенням сторін провідника в межах (1,4...2).



При  $q'_\text{д} > 25 \text{ мм}^2$  – одношарова обмотка з голої шинної (рис. 5.43,в) міді, намотаної на ребро (на меншу сторону), зі співвідношенням сторін від 1:5 до 1:10. Попередньо розмір більшої сторони провідника можна прийняти за рис. 5.44.

Рис. 5.43. Структури обмоток ДП

Розміри й переріз ( $q_\text{д}$ ) провідника ОДП вибираються за таблицями Додатків Б, В, Г, після чого уточнюється густина струму ( $j_\text{д}$ ) в ОДП. Структура ізоляції котушки ОДП приймається за табл. 5.29, 5.30, 5.31.

Середня довжина витка ОДП з *ізолюваного* провідника [5], мм,

$$l_{вд} = 2(l_{мд} + b_{мд}) + \pi(b_{кд} + 2b_{ід} + 2b_{сд}). \quad (5.204)$$

Середня довжина витка ОДП з *голої шинної* міді, мм,

$$l_{вд} = 2l_{мд} + \pi(b_{мд} + b_{кд} + 2b_{ід} + 2b_{сд}). \quad (5.205)$$

Тут  $l_{мд}$ ,  $b_{мд}$  – розміри осердя ДП за рис. 5.40, 5.41, 5.42, мм;

$b_{кд}$  – ширина полюсної котушки ОДП, мм;

$b_{ід}$  – однобічна товщина ізоляції осердя ДП, мм;

$b_{сд}$  – однобічний зазор між ізолюваним осердям ДП і котушкою ОДП, мм.

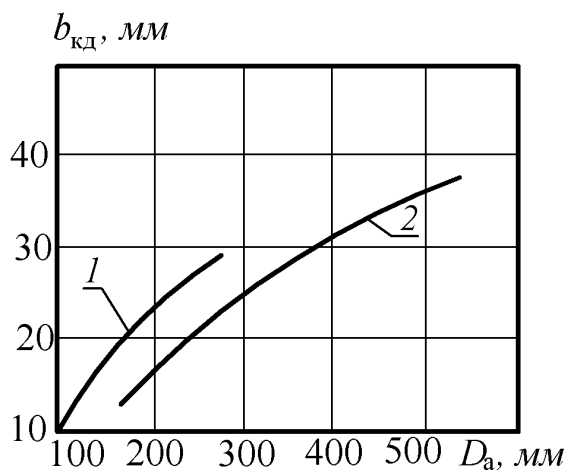


Рис. 5.44.

Попереднє значення ширини котушки обмотки ДП:

1 – багатошарові котушки з ізолюваного провідника;

2 – одношарові з голої шинної міді на ребро

Для котушок з *ізолюваного* провідника (рис. 5.43,а,б)

$$b_{ід} \approx 1,2 \text{ мм}, \quad b_{сд} \approx 0,25 \cdot \sqrt[3]{D_a}. \quad (5.206)$$

Для котушок з *голої шинної* міді (рис. 5.43,в)

$$b_{ід} \approx 2 \text{ мм}, \quad b_{сд} \approx 3 \text{ мм}. \quad (5.207)$$

Опір обмотки додаткових полюсів

$$r_d = \rho_{сц} \cdot \frac{w_d \cdot 2p_d \cdot l_{вд}}{a_d^2 \cdot q_d} \cdot 10^3, \quad (5.208)$$

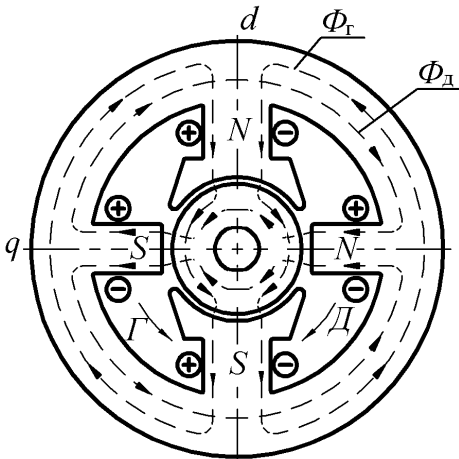
де  $\rho_{сц}$  – питомий електричний опір міді при розрахунковій температурі (табл. 5.17), Ом·м.

Остаточно розміри котушки ОДП і опір обмотки визначаються після

розміщення обмоток у вікні машини.

## 5.16. Оцінка якості розрахунку додаткових полюсів

### 5.16.1. Розрахунок індукції в станині та спинці якоря



Якщо потік додаткового полюса  $\Phi_{мд}$  перевищує 12 % від потоку основних полюсів, необхідно врахувати взаємний вплив цих потоків (рис. 5.45). Для цього розраховуються індукції в ярмі (спинці) якоря й у станині з урахуванням накладання магнітних потоків головних та додаткових полюсів та можливого перевантаження машини

Рис. 5.45. Потоків полюсів

$$B_{j_{\max}} = \frac{\Phi_0 + 1,5\Phi_{Д}}{2h_j \cdot l_{ст} \cdot k_c} \cdot 10^6 \leq 1,6 \text{ Тл}, \quad (5.209)$$

$$B_{c_{\max}} = \frac{\sigma_{Г} \cdot \Phi_0 + 1,5\Phi_{мд}}{2h_c \cdot l_c} \cdot 10^6 \leq 1,4 \text{ Тл}. \quad (5.210)$$

Розміри спинки якоря і станини розраховані у підрозділі 5.9.

### 5.16.2. Розрахунок характеристики намагнічування додаткового полюса

Більш точно перевірка стану магнітного кола МПС при перевантаженні виконується [12] побудовою залежності  $e_k = \varphi(I_a)$ .

За значенням індукції  $B_k = B_{\delta Д}$  для номінального режиму роботи ( $I_a = I_{ан}$ ) можна визначити точку А характеристики  $B_k = \varphi(I_{Д})$  (рис. 5.46). Пряма лінія, проведена з початку координат і через точку А, визначає величину реактивної ЕРС  $e_r$  при довільному значенні струму якоря.

Якщо задатися значенням індукції (рис. 5.46) у зазорі під ДП

$B_{к1} > B_{к}$ , то можна визначити за прямою  $e_{г} = \varphi(I_{д})$  струм якоря  $I_{а1}$ , необхідний для компенсації реактивної ЕРС. Для значень  $B_{к1}$  і  $I_{а1}$  необхідно розрахувати:

– лінійне навантаження якоря,  $A$ ,

$$A_{а1} = A_{а} \cdot I_{а1} / I_{ан}; \quad (5.211)$$

– лінійне навантаження КО,  $A$ ,

$$A_{к1} = A_{к} \cdot I_{а1} / I_{ан}; \quad (5.212)$$

– корисний потік ДП,  $Bб$ ,

$$\Phi_{д1} = \Phi_{д} \cdot B_{к1} / B_{к}; \quad (5.213)$$

– потік в осерді ДП,  $Bб$ ,

$$\Phi_{мд1} = \Phi_{д1} \cdot \sigma_{д}; \quad (5.214)$$

– магнітну індукцію в осерді ДП,  $Tл$ ,

$$B_{мд1} = B_{мд} \cdot \Phi_{мд1} / \Phi_{мд}; \quad (5.215)$$

– МРС зазору між ДП і якорем,  $A$ ,

$$F_{\delta_{д1}} = 0,8 B_{к1} \cdot \delta_{да} \cdot k_{\delta д} \cdot 10^3; \quad (5.216)$$

– МРС зазору між ДП і станиною,  $A$ ,

$$F_{\delta_{дс1}} = 0,8 B_{мд1} \cdot \delta_{дс} \cdot \frac{b_{мд}}{(b_{мд} + 2\delta_{дс})} 10^3; \quad (5.217)$$

– МРС осердя ДП,  $A$ ,

$$F_{мд1} = H_{мд1} \cdot h_{д} \cdot 10^{-3}; \quad (5.218)$$

– магнітну індукцію у станині,  $Tл$ ,

$$B_{сд1} = \frac{\Phi_{мд1}}{2h_{с} \cdot l_{с}} \cdot 10^6; \quad (5.219)$$

– МРС станини від потоку ДП,  $A$ ,

$$F_{сд1} = H_{сд1} \cdot L_{с} \cdot 10^{-3}; \quad (5.220)$$

– магнітну індукцію в зубцях якоря,  $Tл$ ,

$$B_{зд1} = B_{зср} \cdot B_{к1} / B_{\delta}, \quad (5.221)$$

де  $B_{зср}$ ,  $B_{\delta}$  – індукція в середньому перерізі зубця якоря та індукція в повітряному зазорі під головним полюсом, приймається за результатами розрахунку магнітного кола машини;

– МРС зубців якоря,  $A$ ,

$$F_{зд1} = H_{зд1} \cdot h_{п} \cdot 10^{-3}; \quad (5.222)$$

– магнітну індукцію у спинці якоря,  $Tл$ ,

$$B_{jd1} = \frac{\Phi_{д1}}{2h_j \cdot l_{ст} \cdot k_c} \cdot 10^6; \quad (5.223)$$

– МРС спинки якоря від потоку ДП,  $A$ ,

$$F_{jd1} = H_{jd1} \cdot L_j \cdot 10^{-3}; \quad (5.224)$$

– струм намагнічування додаткового полюса, необхідний для компенсації МРС на лінії геометричної нейтралі й реактивної ЕРС,  $A$ ,

$$I_{д1} = \frac{A_{a1} \frac{\tau}{2} 10^{-3} - A_{к1} \frac{b_p}{2} 10^{-3} + F_{\delta_{dj1}} + F_{\delta_{дс1}} + F_{зд1} + F_{мд1} + F_{сд1} + F_{jd1}}{w_{д}}. \quad (5.225)$$

Внаслідок насичення магнітного кола при перевантаженні МПС струм намагнічування  $I_{д1} > I_{a1}$  (рис. 5.46).

Задаючи ряд значень індукції ( $B_{кi}$ ) у повітряному зазорі ДП і розраховуючи струм намагнічування ( $I_{ді}$ ) ДП, можна побудувати криву зміни ЕРС  $e_k$  залежно від струму ДП (рис. 5.46).

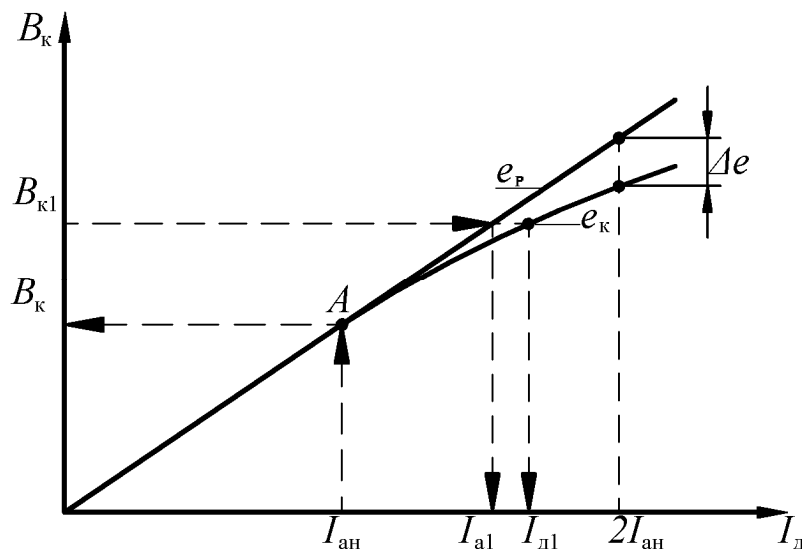


Рис. 5.46.  
До визначення  
якості  
розрахунку  
ДП

Якщо при струмі ДП  $I_{\text{Д}} = 2I_{\text{ан}}$  величина  $\Delta e = \frac{e_{\text{р}} - e_{\text{к}}}{e_{\text{р}}} \leq (5 \dots 10) \%$

(рис. 5.44), то можна вважати, що ДП забезпечить задовільну комутацію, інакше необхідно збільшити повітряний зазор під ДП, уточнити число витків ДП і повторити розрахунок ДП.

### 5.16.3. Розрахунок фактора іскріння

Оцінку комутації МПС (особливо тягових) можна виконати [4; 7] за фактором іскріння

$$\Phi_1 = \left( \frac{400}{D_{\text{к}}} \right)^{1,5} \cdot \frac{L_{\text{с}} \cdot i_{\text{к}}^2}{2} \cdot \frac{\mathcal{G}_{\text{к}}}{t_{\text{к}} \cdot l_{\text{щб}}} \cdot 10^4. \quad (5.226)$$

Тут  $D_{\text{к}}$ ,  $t_{\text{к}}$ ,  $l_{\text{щб}}$  – колектора, колекторний розподіл, довжина щіток одного щіткотримача, мм;  $i_{\text{к}}$  – струм у секції, що комутується, ОЯ, А;  $L_{\text{с}}$  – індуктивність секції ОЯ, діаметр  $\Gamma_{\text{н}}$ ;  $\mathcal{G}_{\text{к}}$  – лінійна швидкість колектора, м/с.

Індуктивність секції ОЯ,  $\Gamma_{\text{н}}$ ,

$$L_{\text{с}} = 2 \cdot \mu_0 \cdot l_{\text{а}} \cdot \lambda_{\sigma} \cdot w_{\text{с}}^2 = 2,51 \cdot l_{\text{а}} \cdot \lambda_{\sigma} \cdot w_{\text{с}}^2 \cdot 10^{-9}, \quad (5.227)$$

де коефіцієнт питомої магнітної провідності розсіяння

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{л}}. \quad (5.228)$$

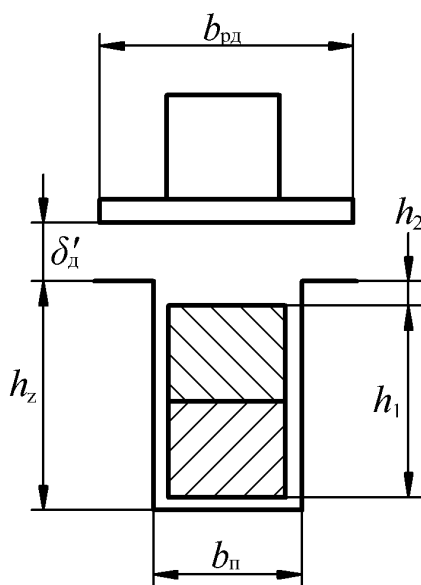


Рис. 5.47. До розрахунків  $\lambda_{\text{п}}$

$$\text{Тут } \lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1}{3 \cdot b_{\text{п}}}; \quad (5.229)$$

$$\lambda_{\text{п2}} = k_{\text{в}} \cdot \frac{h_2}{b_{\text{п}}}, \quad (5.230)$$

де  $k_{\text{в}} = 1$  – при кріпленні ОЯ склобандажами або немагнітним дротом;

$k_{\text{в}} = 2$  – при кріпленні ОЯ магнітним дротом;

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{b_{\text{рД}} - b_{\text{п}}}{4 \cdot \delta'_д \cdot k_{\delta\text{Д}}}. \quad (5.231)$$



При немагнітних бандажах

$$\lambda_{\text{л}} = 0,37 \cdot \frac{l_{\text{л}}}{l_{\text{а}}} \cdot \lg \left( 1 + \frac{\pi \cdot \tau}{4h_z} \right). \quad (5.232)$$

При магнітних бандажах

$$\lambda_{\text{л}} = 0,08 \cdot \frac{\tau^2}{l_{\text{а}} \cdot h_z}. \quad (5.233)$$

У формулах (5.229)–(5.233) усі позначення приймаються за рис. 5.47.

Струм у секції, що комутується,  $A$ ,

$$i_{\text{к}} = e_r \cdot \frac{k_{\text{о}} \cdot k_r}{R_{\text{щ}} + r_{\text{с}}}, \quad (5.234)$$

де  $r_{\text{с}}$  – опір секції ОЯ, Ом,

$$r_{\text{с}} = \rho_{\text{сц}} \cdot \frac{w_{\text{с}} \cdot l_{\text{ва}}}{q_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ел}}} \cdot 10^3; \quad (5.235)$$

$k_r = \frac{e_r - e_{\text{к}}}{e_r}$  – коефіцієнт, який враховує некомпенсовану реактивну

ЕРС у замкненій накоротко секції ОЯ (табл. 5.28);

$k_{\text{о}}$  – коефіцієнт, який враховує тип ОЯ (табл. 5.28).

Таблиця 5.28

Значення коефіцієнтів  $k_{\text{о}}$ ,  $k_r$

Тип ОЯ	$k_{\text{о}}$	$k_r$		
		$u_{\text{п}} = 3, 5, 7$	$u_{\text{п}} = 4$	$u_{\text{п}} = 6$
Петльова	1	0,1	0,18	0,18
Хвильова	$p$	0,13	0,18	0,1

$R_{\text{щ}}$  – опір перехідного контакту щітка – колектор, Ом,

$$R_{\text{щ}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{щб}}} \cdot \beta_{\text{щ}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}} \cdot p}{I_{\text{ан}}} \cdot \frac{b_{\text{щ}}}{t_{\text{к}}}, \quad (5.236)$$

де  $\Delta U_{\text{щ}}$  – спадання напруги у двох перехідних шарах під щіткою, В;

$I_{\text{щб}} = I_{\text{ан}} / p$  – струм щіткотримача, А;

$\beta_{\text{щ}} = b_{\text{щ}}/t_{\text{к}}$  – коефіцієнт щіткового перекриття.

Для класів комутації 1,  $1\frac{1}{4}$  фактор іскріння  $\Phi_1 \leq (0,05 \dots 0,18)$ , для класу  $1\frac{1}{2}$  –  $\Phi_1 \leq (0,18 \dots 0,45)$ .

При установці тільки двох щіткотримачів (МПС з хвильовою обмоткою якоря) дві комутуючі секції з'єднуються послідовно, індуктивність секції ( $L_{\text{с}}$ ) збільшується у 2 рази, струм у секції ОЯ, що комутується, ( $i_{\text{к}}$ ) збільшується майже вдвічі. Це приводить до збільшення фактора іскріння ( $\Phi_1$ ) орієнтовно пропорційно  $2^3$ . Тому установку неповного комплекту щіткотримачів можна допустити тільки в тихохідних машинах з легкою комутацією.

### 5.17. Розміщення обмоток головних і додаткових полюсів

Для виконання остаточних розрахунків МРС обмоток необхідно:

- побудувати графік  $E / \omega_{\text{н}} = \varphi(F_{\Sigma})$  за даними розрахунків характеристики неробочого ходу;
- розрахувати величину номінальної ЕРС  $E_{\text{н}}$

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - \left[ I_{\text{ан}} (r_{\text{а}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{с}} + r_{\text{ко}}) + 2\Delta U_{\text{щ}} \right], \quad (5.237)$$

де  $r_{\text{а}}$ ,  $r_{\text{дп}}$ ,  $r_{\text{с}}$ ,  $r_{\text{ко}}$  – опір обмотки якоря, додаткових полюсів, послідовної обмотки збудження, компенсаційної обмотки, Ом;

$2\Delta U_{\text{щ}}$  – спадання напруги в щітковому контакті за табл. 5.25, В;

- розрахувати

$$c \cdot \Phi_{\text{н}} = E_{\text{н}} / \omega_{\text{н}}; \quad (5.238)$$

- по осі ординат графіка  $E_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = \varphi(F_{\Sigma})$  відкласти отримане значення  $c\Phi_{\text{н}}$  й знайти відповідну величину  $F_{\Sigma}$ . При значній (більш ніж 5 %) відмінності значення  $F_{\Sigma}$  від прийнятого на початку розрахунків за п. 5.12.1 необхідно виконати остаточні розрахунки обмоток збудження за формулами (5.143)–(5.158).

Розміщення ОЗ і обмотки додаткових полюсів (ОДП) у вікні машини виконується після вибору стандартних (нормалізованих). Для уніфікації провід-

ники обмотки послідовного збудження й ОДП вибираються однаковими.

Перевірка можливості розміщення обмоток у вікні між головним і додатковим полюсами полягає у розрахунку розмірів котушок по ширині та висоті, а потім у розміщенні їх у вікні між полюсами завдяки виконанню ескізу вікна в масштабі (рис. 5.48, 5.49).

Рис. 5.48.  
Ескіз вікна МПС  
з овальними пазами:  
1 – обмотка паралельного збудження;  
2 – обмотка додаткових полюсів;  
3 – обмотка послідовного збудження (стабілізуюча обмотка)

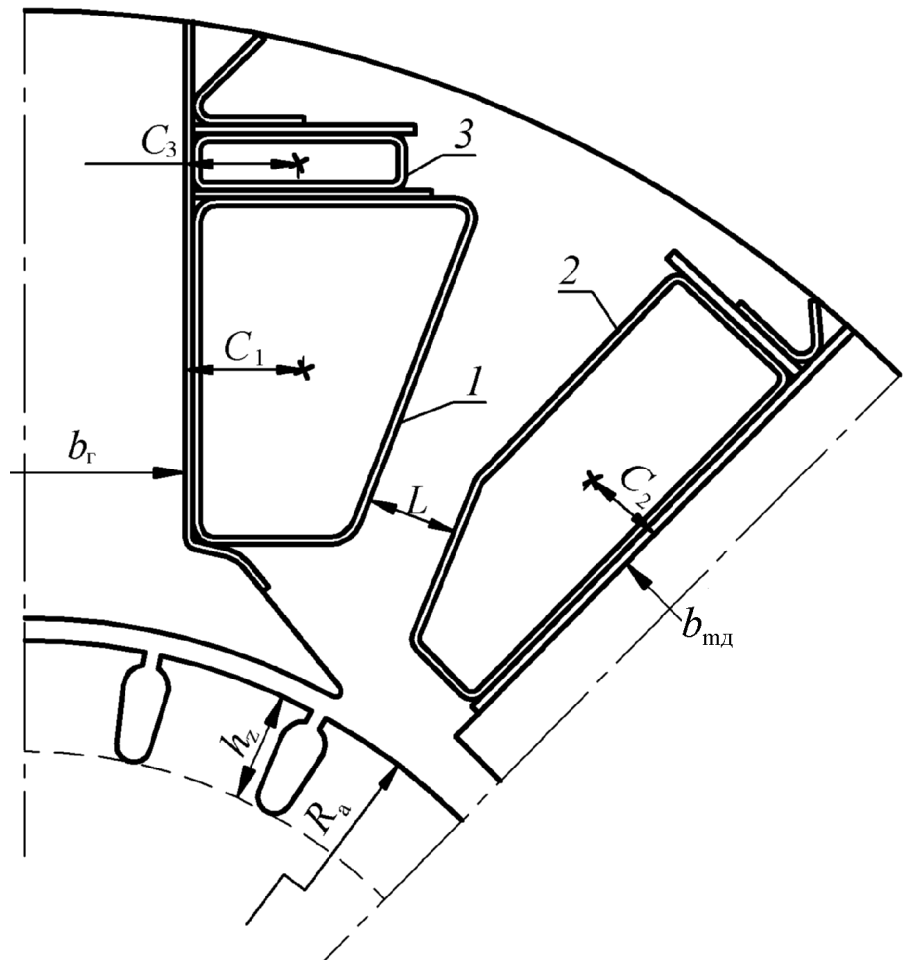
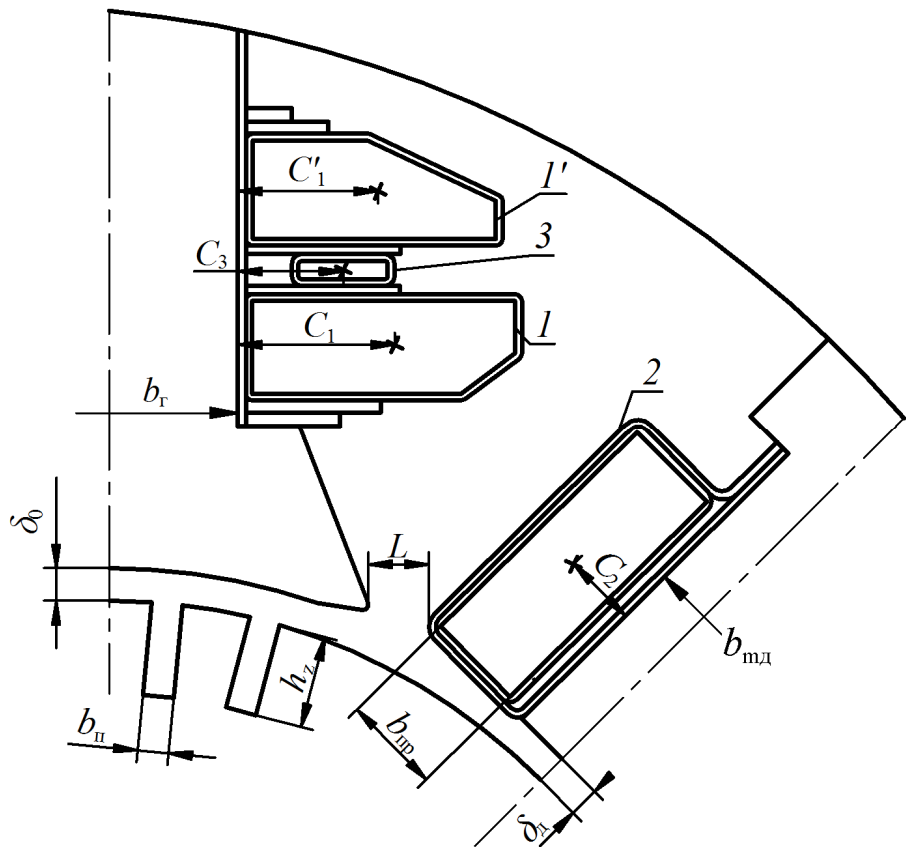


Рис. 5.49.  
 Ескіз вікна  
 МПС  
 із відкритими  
 пазами:  
 1, 1' – обмот-  
 ка паралель-  
 ного збу-  
 дження;  
 2 – обмотка  
 додаткових  
 полюсів;  
 3 – обмотка  
 послідовного  
 збудження  
 (стабілізуюча  
 обмотка)



Послідовність розрахунків така:

- конструкція обмоток, марки проводів, стандартні перерізи проводів (шин) обмоток, їх розміри без ізоляції ( $a'_{\text{пр}}, b'_{\text{пр}}$ ) і з ізоляцією ( $a_{\text{пр}}, b_{\text{пр}}$ ) відомі за результатами розрахунків обмоток збудження й ДП;

- залежно від висоти осі обертання ДПТ за табл. 5.29, 5.30 і 5.31 вибирається тип і конструкція ізоляції зазначених обмоток з урахуванням заданого класу нагрівостійкості;

- методом послідовних наближень за допомогою розрахунків і ескізів вікна виконується розкладка провідників по ширині та висоті котушок обмоток таким чином, щоб останні разом з ізоляцією, дистанційними прокладками та кріпильними деталями розміщалися по висоті полюсів, а відстань між виступаючими краями обмоток головного й додаткового полюсів та елементами заземленої магнітної системи машини була не меншою ніж 6 мм для машин з  $h_0 \leq 200$  мм і 8 мм при  $h_0 > 200$  мм.

Розкладку витків  $w_3$  у багатошарових котушках з ізольованих провідників діаметром  $d_{\text{пр}}$  (наприклад паралельна обмотка збудження) зручно виконувати, визначаючи попередньо займану ними площу вікна між полюсами з урахуванням нещільного намотування витків,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{\text{обм}} = 1,2 \left( d_{\text{пр}} \right)^2 \cdot w_3. \quad (5.239)$$

Обмотка з поперечним перерізом  $S_{\text{обм}}$  може бути розміщена на полюсі

відповідно до прийнятої конструкції у вигляді однієї (рис. 5.48) або двох (рис. 5.49) катушок. В обох випадках при розміщенні обмотки на полюсі слід врахувати розміри ізоляції катушок, каркасів, рамок, скоб, а також наявність на цьому полюсі інших обмоток.

Орієнтовне значення ширини ( $b_K$ ) і висоти ( $h_K$ ) катушок з круглого ізолюваного провідника, *мм*,

$$b_K = 1,05 \cdot N_{\text{Ш}} \cdot d_{\text{пр}} + b_{\text{из}}; \quad (5.240)$$

$$h_K = 1,05 \cdot N_{\text{В}} \cdot d_{\text{пр}} + h_{\text{из}} + b_{\text{вк}}. \quad (5.241)$$

Для багат шарових обмоток з ізолюваного провідника прямокутного перерізу (обмотки додаткових полюсів, обмотки послідовного збудження) розкладку витків виконують виходячи з намотування проводів більшою стороною ( $b$ ) за висотою полюса, відповідно до чого ширина ( $b_K$ ) і висота ( $h_K$ ) катушки, *мм*,

$$b_K = 1,05 \cdot N_{\text{Ш}} \cdot a_{\text{пр}} + b_{\text{из}}; \quad h_K = 1,05 \cdot N_{\text{В}} \cdot b_{\text{пр}} + h_{\text{из}} + b_{\text{вк}}, \quad (5.242)$$

де  $a_{\text{пр}}, b_{\text{пр}}$  – розміри сторін ізолюваного провідника, *мм*;

$N_{\text{Ш}}, N_{\text{В}}$  – число витків по ширині катушки та по висоті полюса;

$b_{\text{из}}, h_{\text{из}}$  – розміри ізоляційних прокладок і каркаса катушки по ширині та висоті за табл. 5.29, 5.30, 5.31, *мм*;

$b_{\text{вк}} \approx (8 \dots 10)$  *мм* – ширина вентиляційного каналу у випадку, якщо ОЗ виконано у вигляді двох катушок, *мм*.

Висота одношарової катушки, намотаної на ребро з неізолюваних провідників (шин) (рис. 5.49, обмотка 2), *мм*,

$$h_K = 1,03 \cdot [w_{\text{В}} \cdot a_{\text{Ш}} + (w_{\text{В}} - 3) \cdot \Delta_{\text{іВ}}] + \Delta_{\text{кр}}. \quad (5.243)$$

Тут  $a_{\text{Ш}}$  – менший розмір провідника (шини), *мм*;  $\Delta_{\text{іВ}} = 0,3$  *мм* – товщина ізоляційної прокладки між витками, *мм*;  $\Delta_{\text{кр}} = 2$  *мм* – товщина посиленої ізоляції крайніх витків катушки, *мм*;  $w_{\text{В}}$  – число витків обмотки.

При розкладці обмотки ДП необхідно прагнути розташувати її ближче до повітряного зазору машини (рис. 5.49, обмотка 2), тому що це приводить до зменшення розсіяння додаткового полюса.

У результаті виконання ескізу міжполюсного вікна може виявитися, що розміщення обмоток з обраними розмірами сторін прямокутних проводів неможливо. У цьому випадку рекомендується вибрати провідники з іншими розмірами сторін, але з тим самим (або найближчим) перерізом.

У розрахунковій записці повинен бути поміщений остаточний ескіз міжполюсного вікна із зазначенням масштабу, усіх основних розмірів і специфікацій ізоляції.

За даними розміщення обмоток головного і додаткового полюсів слід уточнити середні довжини витків обмоток та їх опори при розрахунковій температурі.

Середня довжина (мм) витка обмотки розраховується за такими формулами:

– для багат шарової котушки (рис. 5.48, обмотки 1, 2, 3, рис. 5.49, обмотки 1, 1'), мм,

$$l_{\text{В}} = 2(l_{\Gamma} + b_{\Gamma}) + \pi(2c + 0,5); \quad (5.244)$$

– для одношарової обмотки з неізолюваної мідної шини, намотаної на ребро (рис. 5.49, обмотки 2, 3), мм,

$$l_{\text{В}} = 2l_{\Gamma} + \pi(b_{\Gamma} + b_{\text{пр}} + 1,0), \quad (5.245)$$

де  $l_{\Gamma} = l_{\text{а}}$  – довжина полюса, мм;  $b_{\Gamma}$  – ширина полюса, мм;  $b_{\text{пр}}$  – більший розмір провідника (шини), мм;

– для багат шарової обмотки, яка складається з двох котушок (рис. 5.49, обмотки 1, 1'), визначається середня довжина витка кожної котушки за формулою (5.244) –  $l_{\text{В}1}, l'_{\text{В}1}$ , а потім середня довжина витка обмотки, мм

$$l_{\text{В}} = 0,5(l_{\text{В}1} + l'_{\text{В}1}). \quad (5.246)$$

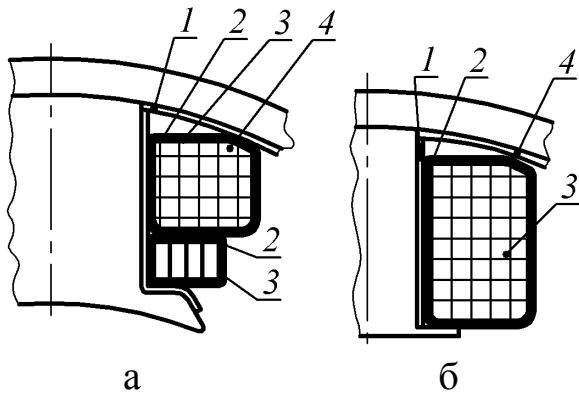
При виконанні ескізу вікна між полюсами уточнюється висота полюсного наконечника головного полюса, мм,

$$h_{\text{ГН}} = 0,6 \cdot (b_{\text{р}} - b_{\Gamma}) \cdot \frac{B_{\delta}}{B_{\Gamma}}, \quad (5.247)$$

де  $B_{\delta}$  – індукція в повітряному зазорі, Тл;

$b_{\text{р}}$  – дійсна ширина полюсної дуги, мм;

$b_{\Gamma}$  – ширина головного полюса, мм.

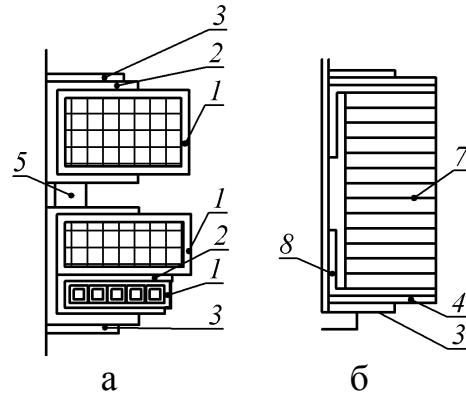


Таблиця 5.29

Ізоляція обмоток головних (а) і додаткових (б) полюсів машин постійного струму ( $h_0 = 80 \dots 200$  мм, напруга до 600 В)

По-зи-ція	Призначення	Матеріал			То-вщи-на, мм	Число шарів
		Клас нагрівостійкості				
		<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>		
1	Ізоляція осердя (напилювання)	Епоксидна смола			1	—
2	Ізоляція котушки	Лакотканинослюдодпласт			0,25	1
		ГІТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГП-ЛСП-ЛСЛ	ГК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Те саме	Скляна стрічка ЛЕС			0,1	1 врів-нахльосту
4	Рамка	Склотекстоліт			0,5	1
		СТ	СТЕФ	СТК		

Таблиця 5.30

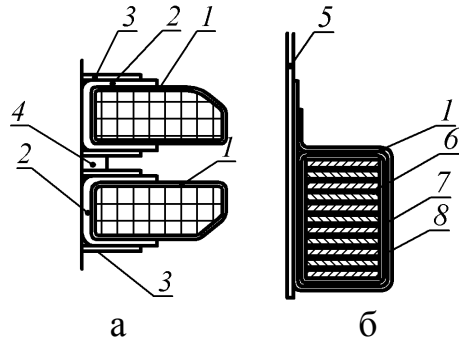


Ізоляція обмоток головних (а) і додаткових (б)  
полюсів машин постійного струму  
( $h_0 = (225 \dots 315)$  мм, напруга до 600 В)

Позиція	Призначення	Матеріал			Товщина, мм	Число шарів
		Клас нагрівостійкості				
		<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>		
1	Ізоляція котушки	Скляна стрічка ЛЕС			0,1	1 врівнахльосту
2	Каркас	Склолакотканина			2	1
		ГІТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГІП-ЛСП-ЛСЛ	ГІК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Рамка	Сталь Ст3			1,5	1
		Склотекстоліт			0,5	1
		СТ	СТЕФ	СТК		
5	Скоба	Сталь Ст3			8-10	1
6	Ізоляція осердя	Слюдопластофолій ІФГ-Б	Синтофолій F	Синтофолій H	0,16	7,5
7	Прокладка міжвиткова	Азбестовий папір	Фенилонований папір 0,2 мм		0,2 × 2	1
8	Ізоляція кутів	Скляна стрічка ЛЕС				1 врівнахльосту



Таблиця 5.31



Ізоляція обмоток головних(а) і додаткових (б)  
полюсів машин постійного струму  
( $h_0 = (355 \dots 500)$  мм, напруга до 1000 В)

Позиція	Призначення	Матеріал			Товщина, мм	Число шарів
		Клас нагрівостійкості				
		<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>		
1	Ізоляція котушки	Скляна стрічка ЛЭС			0,1	1 врів- нахльосту
2	Каркас	Склолакотканина			3,5	1
		ГІТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГІП-ЛСП-ЛСЛ	ГІК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Рамка	Сталь Ст3			2-3	1
4	Скоба	Сталь Ст3			8-12	1
5	Ізоляція осердя	Слюдопласто- фолій ІФГ-Б	Синтофолій F	Синтофолій H	0,16	7,5
6	Прокладка між- жвиткова	Азбестовий папір	Фенилонований папір 0,2 мм		0,4	1
7	Ізоляція котушки	Склянослюдінитова лента ЛС-ПЕ-934-ТП	Полімідна плівка ПМ 0,05 мм х3		0,15	7
8	Хомут	Латунь Л62			2	1

## 5.18. Розрахунок втрат і ККД

Сума втрат у машині постійного струму,  $Вт$ ,

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_e + \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + \Delta p_{дод}, \quad (5.248)$$

де  $\Delta p_e$  – електричні втрати,  $Вт$ ;  $\Delta p_{ст}$  – магнітні втрати в сталі осердя якоря,  $Вт$ ;  $\Delta p_{мех}$  – механічні втрати,  $Вт$ ;  $\Delta p_{дод}$  – додаткові втрати,  $Вт$ .

### Електричні втрати

$$\Delta p_e = \Delta p_{ea} + \Delta p_{ec} + \Delta p_{ед} + \Delta p_{ек} + \Delta p_{ез} + \Delta p_{ещ}: \quad (5.249)$$

– втрати в обмотці якоря,  $Вт$ ,

$$\Delta p_{ea} = I_{ан}^2 \cdot r_a; \quad (5.250)$$

– втрати в послідовній (стабілізуючій) обмотці,  $Вт$ ,

$$\Delta p_{ec} = I_{ан}^2 \cdot r_c; \quad (5.251)$$

– втрати в обмотці додаткових полюсів,  $Вт$ ,

$$\Delta p_{ед} = I_{ан}^2 \cdot r_d; \quad (5.252)$$

– втрати в компенсаційній обмотці,  $Вт$ ,

$$\Delta p_{ек} = I_{ан}^2 \cdot r_k; \quad (5.253)$$

– втрати в обмотці паралельного (незалежного збудження),  $Вт$ ,

$$\Delta p_{ез} = U_3 \cdot I_3 = U_3^2 / r_3, \quad (5.254)$$

де  $U_3$  – напруга на обмотці збудження,  $В$ . При паралельному збудженні  $U_3 = U_H$ ;

– втрати в перехідному щітковому контакті,  $Вт$ ;

$$\Delta p_{ещ} = \Delta U_{щ} \cdot I_{ан}, \quad (5.255)$$

де  $\Delta U_{щ}$  – перехідне спадання напруги в щітках, приймають за табл. 5.25 відповідно до обраної марки щіток,  $В$ ;

При розрахунку електричних втрат усі опори приводяться до робочої температури заданого класу нагрівостійкості ізоляції.

### Магнітні втрати в сталі осердя якоря

Втрати в сталі зубців якоря,  $Вт$ ,

$$\Delta p_{ст_z} = 2,3 \cdot \Delta p_{1/50} \cdot \left( f_{пер} / 50 \right)^\beta \cdot B_z^2 \cdot G_z. \quad (5.256)$$

Втрати в сталі спинки якоря,  $Вт$ ,

$$\Delta p_{стj} = 2,3 \cdot \Delta p_{1/50} \cdot \left( f_{пер} / 50 \right)^\beta \cdot B_j^2 \cdot G_j. \quad (5.257)$$

Тут  $\Delta p_{1/50}$  – питомі втрати в сталі при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування сталі 50 Гц (табл. 5.32),  $Вт/кг$ ;

$f_{пер}$  – частота перемагнічування сталі якоря, Гц;

$B_{z\text{сер}}, B_j$  – індукція в середньому перерізі зубця і спинки якоря, Тл;

$G_z$  – маса сталі зубців якоря, кг:

– при овальних напівзакритих пазах (рис. 5.11)

$$G_z = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot Z \cdot b_z \cdot \left( h_{п1} + \frac{d_1 + d_2}{4} \right) \cdot l_{ст} \cdot k_c; \quad (5.258)$$

– при прямокутних відкритих пазах (рис. 5.15)

$$G_z = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot Z \cdot b_{z\text{ср}} \cdot h_z \cdot l_{ст} \cdot k_c. \quad (5.259)$$

$G_j$  – маса сталі спинки якоря, кг:

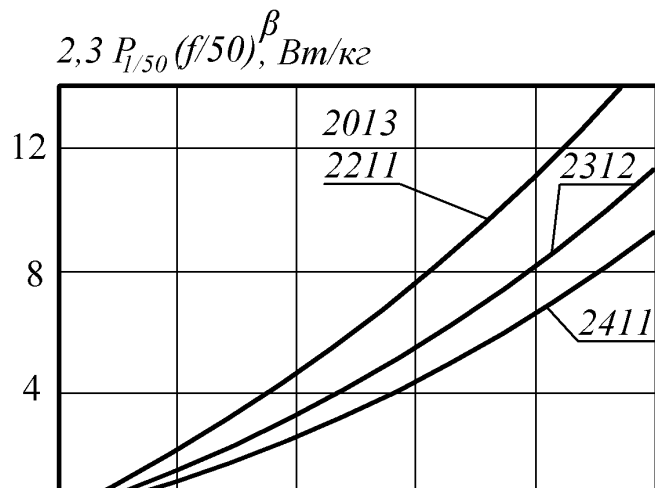
– за відсутності аксіальних вентиляційних каналів

$$G_j = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_a - 2h_z)^2 - d_B^2 \right] \cdot l_{ст} \cdot k_c; \quad (5.260)$$

– за наявності в якорі  $n_{ка}$  аксіальних вентиляційних каналів діаметром  $d_{ка}$ , мм,

$$G_j = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (D_a - 2h_z)^2 - d_B^2 - d_{ка} \cdot n_{ка} \right] \cdot l_{ст} \cdot k_c. \quad (5.261)$$

Таблиця 5.32		
Питомі втрати		
Марка сталі	$\Delta p_{1/50}$ , $Вт/кг$	$\beta$
2013, 2211	2,5 ... 2,6	1,5
2312	1,75	1,4



2411	1,6	1,3
------	-----	-----

Коефіцієнт 2,3 в формулах (5.256, 5.257) враховує збільшення магнітних втрат, обумовлених технологічним процесом виготовлення осердя якоря. Для спрощення розрахунків при визначенні магнітних втрат в осерді якоря значення  $\left(2,3 \cdot \Delta p_{1/50} \cdot (f_{\text{пер}} / 50)^\beta\right)$  можна прийняти за рис. 5.50.

При кріпленні обмотки якоря бандажами зі сталевого магнітного дроту необхідно врахувати втрати в них, прийнявши їх рівними орієнтовно 10 % від втрат у сталі якоря

$$\Delta p_{\text{ст}_6} \approx 0,1 \left( \Delta p_{\text{ст}_z} + \Delta p_{\text{ст}_j} \right). \quad (5.262)$$

### Механічні втрати

$$\Delta p_{\text{мех}} = \Delta p_{\text{тщ}} + \Delta p_{\text{п}} + \Delta p_{\text{в}}. \quad (5.263)$$

Втрати на тертя щіток об колектор, Вт,

$\Delta p_{\text{тщ}}, \text{ Вт}$

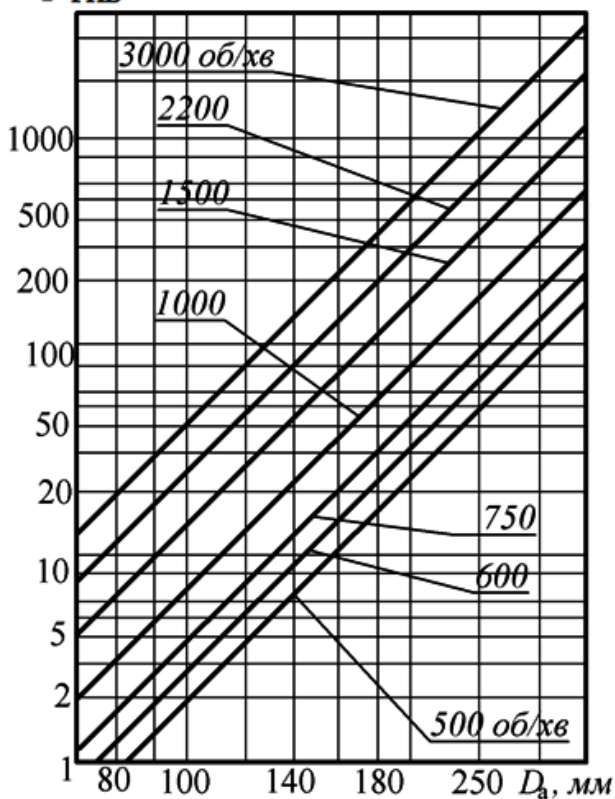


Рис. 5.51. Втрати на тертя в підшипниках кочення і на вентиляцію

$$\Delta p_{\text{тщ}} = k_{\text{щ}} \cdot \Sigma S_{\text{щ}} \cdot \mathcal{G}_k \cdot 10^{-2}, \quad (5.264)$$

де  $k_{\text{щ}} = 9,81 \cdot c_{\text{щ}} \cdot f_{\text{щ}}$ ,

$c_{\text{щ}}$  – коефіцієнт тертя щітки:

$c_{\text{щ}} \approx (0,2 \dots 0,3)$  для вугільної щітки;

$c_{\text{щ}} \approx (0,5 \dots 0,7)$  для інших щіток;

$f_{\text{щ}} \approx (0,15 \dots 0,25) \text{ кг/см}^2$  – тиск на щітку;

Орієнтовно  $k_{\text{щ}} \approx 0,5 \dots 0,6$ .

$\Sigma S_{\text{щ}}$  – контактна площа всіх щіток,  $\text{мм}^2$ ;

$$\Sigma S_{\text{щ}} = 2p \cdot S_{\text{щб}} \quad (5.265)$$

$\mathcal{G}_k$  – окружна швидкість колектора,  $\text{м/с}$ ;

$$\mathcal{G}_k = \pi \cdot D_k \cdot n_H \cdot 10^{-3} / 60. \quad (5.266)$$

Суму втрат ( $\Delta p_{\text{тщ}}$ ) на тертя в підшипниках ( $\Delta p_{\text{п}}$ ) і на вентиляцію

( $\Delta p_B$ ) визначають за рис. 5.51.

### Додаткові втрати в сталі при неробочому ході

У поверхневому шарі полюсних наконечників виникають втрати, обумовлені коливанням магнітної індукції в повітряному зазорі [5]. Однак внаслідок того, що зазор у МПС великий, ці втрати необхідно враховувати тільки при відкритих пазах на якорі .

Амплітуда коливання магнітної індукції

$$B_0 = \beta_0 \cdot B_\delta \cdot k_\delta. \quad (5.267)$$

$\beta_0$  залежить від ширини (відкриття) паза ( $b_{III} = b_{II}$ ) і величини повітряного зазору

$\beta_0 = \varphi\left(\frac{b_{III}}{\delta}\right)$  і вибирається за графіком рис. 5.52.

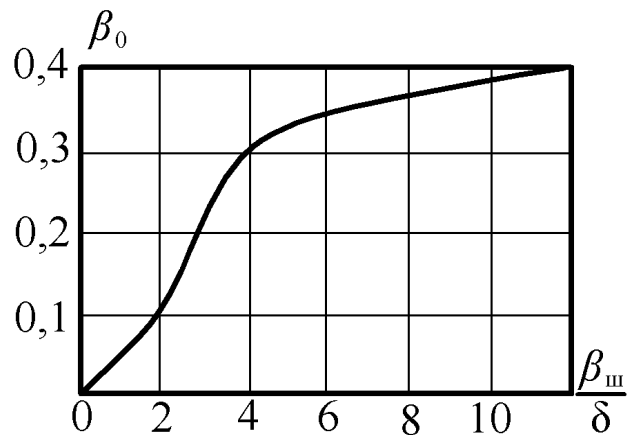


Рис. 5.52. Значення  $\beta_0$

Питомі поверхневі втрати на  $1 \text{ м}^2$  поверхні полюсних наконечників,  $\text{Вт/м}^2$ ,

$$\Delta p_{\text{пов.шт}} = k_0 \cdot \left(\frac{Z \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_1)^2, \quad (5.268)$$

де  $k_0$  залежить від марки сталі й товщини листів, способу обробки магнітопроводу (табл. 5.33).

Таблиця 5.33

#### Значення коефіцієнта $k_0$

Сталь	Товщина, мм	Спосіб обробки		
		без обробки	шліфування	обточування
Електротехнічна	1	4,5	5,0	5,5
	0,5	1,8	2	2,5
	0,35	1,4	1,7	2

<b>Листова конструкційна</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>2,8</b>
	<b>1</b>	<b>4,5</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>
	<b>1,5...2</b>	<b>7,2</b>	<b>8</b>	<b>8,8</b>

**Поверхневі втрати у всіх полюсних наконечниках, Вт,**

$$\Delta p_{\text{пов}} = 2p \cdot \tau \cdot \alpha_{\delta} \cdot l_p \cdot \Delta p_{\text{пов ст}} \cdot 10^{-6}. \quad (5.269)$$

*Повні втрати в сталі, Вт,*

$$\Delta p_{\text{ст}} = \Delta p_{\text{ст з}} + \Delta p_{\text{ст а}} + \Delta p_{\text{ст б}} + \Delta p_{\text{пов}}. \quad (5.270)$$

*Додаткові втрати при номінальному навантаженні*

$$\Delta p_{\text{дод}} = \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{пп}}. \quad (5.271)$$

*Комутаційні втрати в обмотці якоря, Вт*

$$\Delta p_{\text{к}} = (k_{\phi} - 1) \cdot I_{\text{ан}}^2 \cdot r_a, \quad (5.272)$$

де

$$k_{\phi} = \frac{k_{\phi 1} + k_{\phi 2}}{1 + k_{\phi 2}} = (1,02 \dots 1,15). \quad (5.273)$$

$$k_{\phi 1} = 1 + \frac{0,76 \cdot u_{\text{в}}^2 \cdot \xi^2}{2 + \nu}, \quad (5.274)$$

де  $u_{\text{в}}$  – число ефективних провідників по висоті паза;

$\nu$  – коефіцієнт, що враховує вплив періоду комутації

$$\nu = \frac{31 \cdot p}{\xi^2} \cdot \frac{u_{\text{п}} + \beta_{\text{щ}} - 1}{K}, \quad (5.275)$$

де  $K$  – число колекторних пластин;

$\beta_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} / t_{\text{к}}$  – коефіцієнт щіткового перекриття;

$\xi$  – приведена висота провідника

$$\xi = \frac{h_{\text{ел}}}{10} \sqrt{\frac{f_{\text{пер}}}{50} \cdot \frac{u_{\text{п}} \cdot b_{\text{ел}}}{b_{\text{п}}} \cdot \frac{\gamma}{50}}. \quad (5.276)$$

Тут  $h_{\text{ел}}$  – розмір елементарного провідника по висоті паза, мм;

$u_{\Pi}$  – число секційних сторін по ширині паза;

$b_{\text{ел}}$  – розмір елементарного провідника по ширині паза, мм;

$b_{\Pi}$  – ширина паза, мм (рис. 5.53);

$\gamma$  – питома провідність міді при  $t = 75^{\circ}\text{C}$

$$\gamma = 46 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}.$$

$$k_{\phi 2} = (0,5l_{\text{ва}} - l_a) / l_a, \quad (5.277)$$

де  $l_{\text{ва}}$ ,  $l_a$  – середня довжина витка ОЯ і конструктивна довжина якоря.

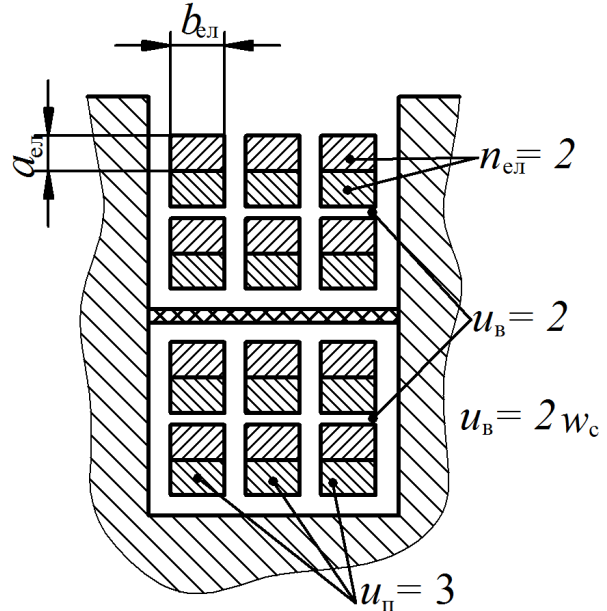


Рис. 5.53. Структура паза ДПТ

**Втрати від поперечного пазового потоку, Вт,**

$$\Delta p_{\text{ПП}} = 1,5 N_a \cdot h_{\text{ел}}^2 \cdot \frac{b_{\text{ел}}}{b_{\Pi}} \cdot f_{\text{пер}}^{1,5} \cdot F_z \cdot l_{\text{ст}} \cdot 10^{-9}, \quad (5.278)$$

де  $N_a$  – число провідників ОЯ;

$h_{\text{ел}}$ ,  $b_{\text{ел}}$  – висота й ширина елементарного провідника ОЯ, мм;

$b_{\Pi}$  – ширина паза якоря, мм;

$F_z$  – МРС зубцевого шару якоря, А;

$f_{\text{пер}}$  – частота перемагнічування, Гц;

$l_{\text{ст}}$  – довжина сталі якоря, мм.

Величину додаткових втрат при номінальному навантаженні можна також визначити:

– для некомпенсованих машин

$$\Delta p_{\text{дод}} = 0,01 \cdot P_{1\text{н}}; \quad (5.279)$$

– для компенсованих машин

$$\Delta p_{\text{дод}} = 0,005 \cdot P_{1\text{н}}. \quad (5.280)$$

При навантаженні, відмінному від номінального, додаткові втрати, Вт,

$$\Delta p_{\text{дод}_i} = \Delta p_{\text{дод}} \cdot \left( \frac{I_{ai}}{I_{ан}} \right)^2. \quad (5.281)$$

Потужність, споживана двигуном,  $Вт$ ,

$$P_1 = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{ан}} + \Delta p_{\text{еш}}. \quad (5.282)$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна постійного струму

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{P_1}. \quad (5.283)$$

Частота обертання двигуна,  $об/хв$ ,

$$n_{\text{н}} = \frac{60 \cdot a}{p \cdot N_a} \cdot \frac{E_{\text{ан}}}{\Phi_{\text{н}}}, \quad (5.284)$$

де ЕРС якоря,  $В$ ,

$$E_{\text{ан}} = U_{\text{н}} - I_{\text{ан}} \cdot R_a - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (5.285)$$

а повний опір кола якоря,  $Ом$ ,

$$R_a = r_a + r_c + r_d + r_k. \quad (5.286)$$

Струм, що споживається з мережі при паралельному (змішаному) збудженні ДПТ,  $А$ ,

$$I = I_{\text{ан}} + U_{\text{н}}/r_z. \quad (5.287)$$

Момент на валу двигуна,  $Н \cdot м$ ,

$$M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_{\text{н}}}. \quad (5.288)$$

За наведеним алгоритмом розраховуються втрати, ККД для номінального режиму роботи двигуна.

Повний розрахунок та побудова робочих характеристик (рис. 12.10) виконується за результатами розрахунку двигуна на ПК (Додаток Д).

## 5.19. Розрахунки максимальної частоти обертання двигуна

### 5.19.1. Регулювання частоти обертання збільшенням напруги

Оскільки регулювання здійснюється при постійному магнітному потоці, можливі два режими роботи – при постійному моменті навантаження на валу двигуни й при постійній потужності на валу.



### **Регулювання при постійному моменті на валу ( $I_a = I_{ан}$ )**

Найбільше значення кутової швидкості,  $rad/c$ ,

$$\omega_{max} = \frac{U_{1_{max}} - I_{ан} \cdot R_a}{c \cdot \Phi_H} = \frac{2\pi \cdot a \cdot (U_{1_{max}} - I_{ан} \cdot R_a)}{p \cdot N_a \cdot \Phi_H}. \quad (5.289)$$

Оскільки обмеження  $U_{K_{max}} \leq U_{K_{доп}}$  було враховано на початку розрахунків машини, то необхідно перевірити за формулою (5.179) обмеження на припустиме значення реактивної ЕРС ( $e_{p_{max}} \leq e_{p_{доп}}$ ) секції ОЯ, що комутується. При порушенні обмеження на  $E_{p_{max}}$  необхідно зменшити величину  $U_{1_{max}}$  і знову виконати розрахунки.

### **Регулювання при постійній потужності на валу ( $P_2 = P_{2H}$ )**

Якщо зневажати збільшенням механічних втрат і зміною ККД, то орієнтовно струм якоря,  $A$ ,

$$I_a \approx I_{ан} \cdot U_H / U_{1_{max}}, \quad (5.290)$$

а значення  $\omega_{max}$  визначиться за формулою (5.289) при підстановці розрахованого за формулою (5.290) значення струму якоря. При цьому необхідно перевірити за формулою (5.179) обмеження на припустиме значення реактивної ЕРС ( $e_{p_{max}} \leq e_{p_{доп}}$ ) секції ОЯ, що комутується.

Якщо задати ряд значень напруги з діапазону  $(U_{1_H} \dots U_{1_{max}})$ , то можна розрахувати за формулою (5.289) і побудувати характеристику  $\omega = \varphi(U_1)$ .

### **5.19.2. Регулювання частоти обертання зменшенням магнітного потоку**

Основними факторами, що визначають величину  $\omega_{max}$ , є такі:

– стала робота двигуна при послабленому магнітному потоці основ-

них полюсів;

- максимальна напруга між колекторними пластинами  $U_{K_{\max}}$  ;
- максимальне значення реактивної ЕРС секції ОЯ  $E_{p_{\max}}$  .

При цьому мається на увазі, що виконуються обмеження за умови механічної міцності вала.

**Визначення  $\omega_{\max}$  за умови сталої роботи двигуна  
при послабленому магнітному потоці**

При послабленні магнітного потоку основних полюсів і струмах якоря, близьких до номінального, під полюсною дугою відбувається «перекидання» магнітного поля – на частині полюсної дуги магнітне поле змінює свій напрямок. «Перекидання» поля відбувається за умови  $F_{\delta zj} < 0,5 F_{ap}$ . При цьому вважається [3], що стала робота ДПС має місце при послабленому магнітному потоці основних полюсів, якщо  $F_{\delta zj} \geq (0,4 \dots 0,5) \cdot F_{ap}$ . Значення  $F_{ap}$  приймається за (5.132).

Наведене співвідношення МРС є наближеним, тому розрахунок найбільшої кутової швидкості при регулюванні послабленням основного магнітного потоку будується за ітераційним принципом:

- побудувати перехідну характеристику  $B_{\delta} = \varphi(F_{\delta zj})$  (рис. 5.54);
- розрахувати мінімальне значення індукції в повітряному зазорі при заданому в технічному завданні (ТЗ) значенні  $\omega_{\max}$

$$B_{\delta a} = B_{\delta H} \cdot \frac{\omega_H}{\omega_{\max}}; \quad (5.291)$$

- для розрахованого значення індукції  $B_{\delta a} = \overline{GH}$  визначити значення мінімальної МРС перехідного шару  $F_{\delta zj \min} = \overline{OH}$  (рис. 5.54);

- перевірити виконання умови сталої роботи при перекиданому магнітному полі

$$k_{CT} = \frac{F_{\delta zj \min}}{F_{ap}} \geq (0,4 \dots 0,5). \quad (5.292)$$

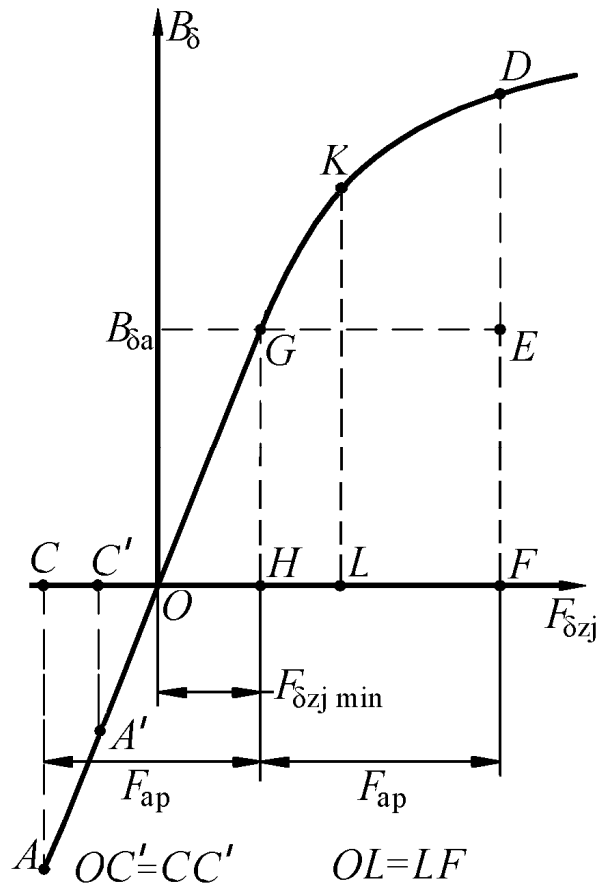


Рис. 5.54.  
Перехідна  
характеристика  
при  
ослабленому  
магнітному  
потюці

**Якщо обмеження (5.292) виконується**, то необхідно перейти до розрахунку  $F_{qd}$  з урахуванням перекидання магнітного поля.

**Якщо обмеження (5.292) не виконується**, це означає, що задана в ТЗ кратність регулювання не може бути забезпечена.

У цьому випадку необхідно визначити максимальну кутову швидкість, яку допускає запроектована машина за умови сталої роботи при ослабленому потоці, для чого необхідно:

– задати значення

$$k_{ст} = \frac{F_{\delta zj \min}}{F_{ap}} = 0,5; \quad (5.293)$$

– розрахувати значення мінімальної MPC перехідного шару

$$F_{\delta zj \min} = 0,5 F_{ap}; \quad (5.294)$$

– для розрахованого значення мінімальної MPC перехідного шару

$$F_{\delta zj \min} = \overline{OH} \text{ визначити значення індукції } B_{\delta a} = \overline{GH} \text{ (рис. 5.54);}$$

– розрахувати кутову швидкість електродвигуна при даному мінімальному значенні магнітного потоку,  $rad/c$ ,

$$\omega_{\max} = \frac{B_{\delta H}}{B_{\delta a}} \cdot \omega_H. \quad (5.295)$$

### **Розрахунок $F_{qd}$ з урахуванням перекидання магнітного поля**

Середнє значення індукції під частиною полюсної дуги з основним напрямком магнітного потоку (рис. 5.54),  $Tл$ ,

$$B_{\delta_{\text{пр}}} \approx \frac{1}{6} \left[ \overline{DF} + 4 \cdot \overline{KL} \right]. \quad (5.296)$$

Середнє значення індукції під частиною полюсної дуги із зустрічним напрямком магнітного потоку (рис. 5.54),  $Tл$ ,

$$B_{\delta_{\text{зв}}} = \frac{1}{6} \left[ \overline{AC} + 4 \overline{A'C'} \right] \approx \frac{1}{2} \overline{AC}. \quad (5.297)$$

Середнє значення індукції в повітряному зазорі під полюсом,  $Tл$ ,

$$B_{\delta_{\text{сер}}} = B_{\delta_{\text{пр}}} - B_{\delta_{\text{зв}}}. \quad (5.298)$$

Зменшення індукції в повітряному зазорі складає,  $Tл$ ,

$$\Delta B_{\delta} = B_{\delta_a} - B_{\delta_{\text{сер}}}. \quad (5.299)$$

Значення  $\Delta B_{\delta}$  відкладається уверх від лінії  $GE$  (рис. 6.55) до перетинання з перехідною характеристикою у точці  $G'$ . Значення  $F_{qd \min}$  визначається згідно з рис. 5.55.

Найбільше значення індукції в повітряному зазорі під головним полюсом при навантаженні двигуна (рис. 5.56),  $Tл$ ,

$$B_{\delta m} = \overline{D''F''}. \quad (5.300)$$

Коефіцієнт перекручування магнітного поля

$$k_i = \frac{B_{\delta m}}{B_{\delta a}} = \frac{\overline{D''F''}}{\overline{GH}}. \quad (5.301)$$

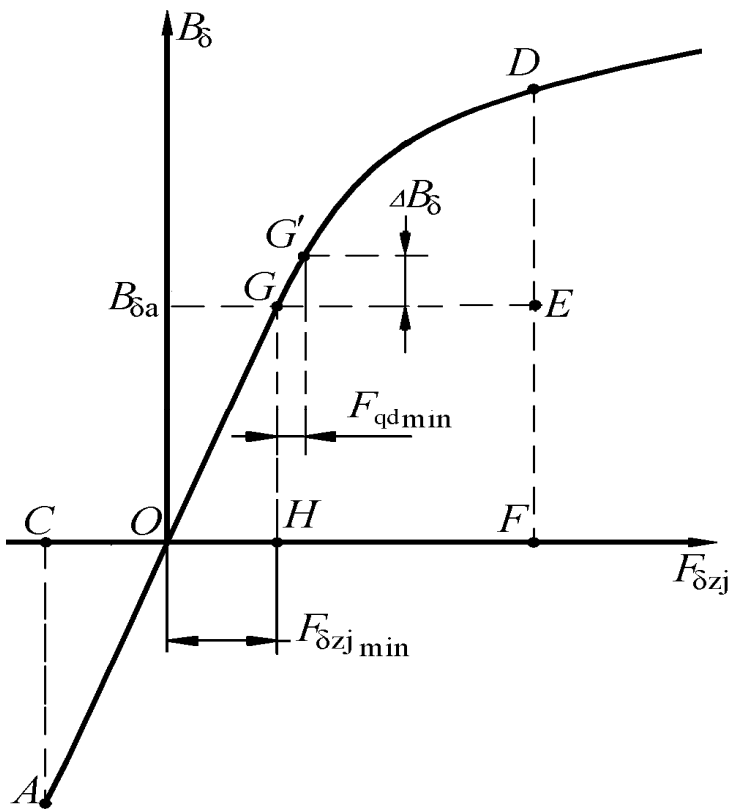


Рис. 5.55.  
До визначення  
 $F_{qd \min}$   
при  
перекиданні  
магнітного  
поля

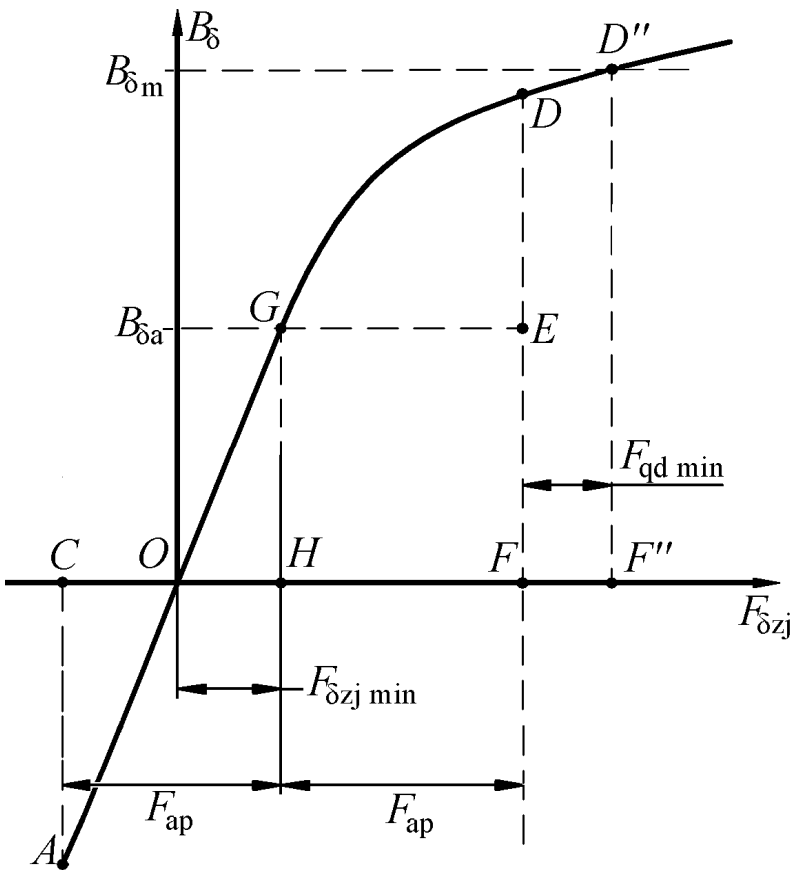


Рис. 5.56.  
До визначення  
найбільшого  
значення  
індукції у  
повітряному  
зазорі

**Перевірка  $\omega_{\max}$  за допустимою напругою  
між колекторними пластинами**

Максимальна напруга між сусідніми колекторними пластинами при послабленні магнітного потоку,  $B$ ,

$$U_{K_{\max}} = \frac{2p \cdot U_H}{\alpha_\delta \cdot K} \cdot k_i = U_K \cdot \frac{k_i}{\alpha_\delta}, \quad (5.302)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт перекручування магнітного поля за формулою (5.301);

$\alpha_\delta$  – розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги.

Отримана величина  $U_{K_{\max}}$  повинна бути меншою від припустимого значення  $U_{K_{\text{доп}}}$ , зазначеного у табл. 5.7. Якщо виявиться, що  $U_{K_{\max}} > U_{K_{\text{доп}}}$ , то необхідно знову виконати розрахунки, задавши трохи більше значення  $k_{\text{СТ}}$ . Цей ітераційний процес повторюється, доки не буде виконуватися умова  $U_{K_{\max}} \leq U_{K_{\text{доп}}}$ .

Таблиця 5.34

Результати розрахунків  $U_{K_{\max}}$

Ітерації	$k_{\text{СТ}}$	$B_{\delta k},$ $Tл$	$B_{\delta a},$ $Tл$	$\omega_{\max},$ $рад/с$	$k_i$	$U_{K_{\max}},$ $B$
1		$\overline{K_1 L_1}$	$\overline{a_1 b_1}$	$\omega_{\max_1}$		
$i$		$\overline{K_i L_i}$	$\overline{a_i b_i}$	$\omega_{\max_i}$		$U_{K_{\max}} \leq U_{K_{\text{доп}}}$

Для подальших розрахунків приймається значення кутової швидкості  $\omega_{\max_i}$  останньої ітерації.

### Перевірка $\omega_{\max}$ за припустимим значенням реактивної ЕРС

Розрахункова величина найбільшої реактивної ЕРС ( $B$ ) секції ОЯ при послабленні магнітного потоку

$$e_{p_{\max}} = e_p \cdot (\omega_{\max_i} / \omega_H), \quad (5.303)$$

де  $e_p$  – середнє значення ЕРС секції, що комутується, за даними розрахунку комутаційних параметрів при номінальній частоті обертання,  $B$ .

Отримана розрахункова величина  $e_{p_{\max}}$  повинна бути меншою від припустимої  $e_{p_{\text{доп}}}$  за табл. 5.35, де більші значення  $e_{p_{\text{доп}}}$  належать до електродвигунів з окружними швидкостями якоря

$$v_a = 0,5D_a \cdot \omega_{\max} \leq (25 \dots 30) \text{ м/с}.$$

Якщо виявиться, що  $e_{p_{\max}} > e_{p_{\text{доп}}}$ , то необхідно задатися більшим значенням  $k_{\text{СТ}}$ , повторити розрахунки  $E_{p_{\max}}$  до задоволення умови  $e_{p_{\max}} \leq e_{p_{\text{доп}}}$ . При цьому умова  $U_{k_{\max}} \leq U_{k_{\text{доп}}}$  буде автоматично виконуватися, тому в цьому випадку перевірку обмеження за  $e_{p_{\text{доп}}}$  не проводять.

**Таблиця 5.35**

### Припустимі значення реактивної ЕРС

$h_0, \text{ мм}$	80...200	225...315	355...500
Тип ОЯ	ПО ( $2p = 2$ ) ХО ( $2p = 4$ ) $w_c > 1$	хвильова	петльова або комбінована
$e_{p_{\text{доп}}}, B$	2,5...3,5	4...5	8...12

Остаточно найбільша кутова швидкість електродвигуна при регулюванні послабленням основного магнітного потоку встановлюється за даними останньої ітерації (табл. 5.36), для якої  $U_{K_{\max}} \leq U_{K_{\text{доп}}}$  й  $e_{p_{\max}} \leq e_{p_{\text{доп}}}$ .

Таблиця 5.36

Результати розрахунків  $E_{p_{\max}}$

Ітерації	$k_{\text{СТ}}$	$B_{\delta a}$	$B_{\delta k}$	$\omega_{\max}$	$E_{p_{\max}}$
	--	$T_l$	$T_l$	рад/с	$B$
1		$\overline{a_1 b_1}$	$\overline{K_1 L_1}$	$\omega_{\max_1}$	
$i$		$\overline{a_1 b_1}$	$\overline{K_i L_i}$	$\omega_{\max_i}$	$e_{p_{\max}} \leq e_{p_{\text{доп}}}$

**У РЕЗУЛЬТАТІ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ ПРОЕКТУВАЛЬНИК ОДЕРЖУЄ ОСТАТОЧНІ ЗНАЧЕННЯ  $\omega_{\max}$ ,  $e_{p_{\max}}$ ,  $U_{K_{\max}}$ ,  $k_i$ .**

### 5.19.3. Розрахунок магніторушійної сили обмотки збудження

МРС основних полюсів,  $A$ ,

$$F_{z_{\min}} = F_{\Sigma \min} + F_{qd_{\min}} \quad (5.304)$$

де  $F_{qd_{\min}}$  – МРС, еквівалентна дії поля якоря, що розмагнічує, при мінімальному магнітному потоці та номінальному струмі якоря,  $A$ ;  
 $F_{\Sigma \min}$  – МРС при неробочому ході за характеристикою намагнічування  $B_{\delta} = \varphi(F_{\Sigma})$  для мінімального значення індукції в зазорі  $B_{\delta a}$ .

### ДПС незалежного збудження

МРС незалежної ОЗ,  $A$ ,

$$F_3 = F_{z_{\min}} \quad (5.305)$$

Струм обмотки незалежного збудження,  $A$ ,



$$I_{3\min} = F_{3\min} / w_H. \quad (5.306)$$

Регулювання струму збудження здійснюється введенням регулювального реостата в коло обмотки незалежного збудження.

Величина опору регулювального реостата в колі обмотки паралельного (незалежного) збудження, яка забезпечує необхідне значення мінімальної МРС,  $O_m$ ,

$$R_{pr} \approx 1,25 \cdot \left( \frac{U_3}{I_{3\min}} - r_3 \right), \quad (5.307)$$

де  $U_3$  – напруга на обмотці збудження,  $B$ .

$U_3 = U_{ан}$  при паралельному або змішаному збудженні,  $B$ .

### ***ДПС паралельного збудження зі стабілізуючою обмоткою***

МРС паралельної ОЗ,  $A$ ,

$$F_{ш\min} = F_{3\min} - F_{ст}, \quad (5.308)$$

де  $F_{ст} = I_{ан} \cdot w_{ст}$  – МРС стабілізуючої обмотки збудження,  $A$ .

Струм паралельної обмотки збудження,  $A$ ,

$$I_{ш\min} = F_{ш\min} / w_{ш}. \quad (5.309)$$

Регулювання струму збудження здійснюється введенням регулювального реостата в коло паралельної обмотки збудження, опір якого розраховується за формулою (5.307).

### ***ДПС послідовного збудження***

МРС послідовної ОЗ,  $A$ ,

$$F_{с\min} = F_{3\min}. \quad (5.310)$$

Струм збудження,  $A$ ,

$$I_{3\min} = I_{с\min} = F_{с\min} / w_c. \quad (5.311)$$

Регулювання струму збудження здійснюється шунтуванням послідовної обмотки збудження.

Кратність ослаблення поля

$$\alpha = F_{c_{\min}} / F_c . \quad (5.312)$$

Опір реостата, яким шунтується послідовна ОЗ, Ом,

$$R_{\text{ш}_c} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot r_c . \quad (5.313)$$

Мінімальне значення струму обмотки послідовного збудження, А,

$$I_{c_{\min}} = \alpha \cdot I_{a_n} . \quad (5.314)$$

### ***ДПС змішаного збудження з перевагою МРС послідовної ОЗ***

Якщо  $F_{\text{ш}} \ll F_{z_{\min}}$ , то регулювання струму збудження здійснюється шунтуванням послідовної обмотки збудження.

Мінімальна МРС послідовної ОЗ, А,

$$F_{c_{\min}} = F_{z_{\min}} - F_{\text{ш}} . \quad (5.315)$$

Кратність зменшення МРС послідовної ОЗ

$$\alpha = F_{c_{\min}} / F_c . \quad (5.316)$$

Опір реостата, що шунтує послідовну ОЗ, визначається за формулою (5.313) а мінімальне значення струму послідовної ОЗ – за формулою (5.314).

### ***ДПС змішаного збудження з перевагою МРС паралельної ОЗ***

Якщо  $F_c \ll F_{z_{\min}}$ , то регулювання струму збудження здійснюється введенням регульовального реостата в коло обмотки паралельного збудження.

Мінімальна МРС паралельної ОЗ, А,

$$F_{\text{ш}_{\min}} = F_{z_{\min}} - F_c . \quad (5.317)$$

Мінімальний струм паралельної обмотки збудження визначається за (5.306), величина опору регульовального реостата, що вмикається в коло паралельної обмотки збудження, – за (5.307)

При розрахунках МРС обмоток збудження для регулювання частоти обертання зменшенням магнітного потоку значення МРС  $F_{\text{ш}}$ ,  $F_c$  приймаються за даними розрахунку обмоток збудження (5.143, 5.154).

## 6. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА

### 6.1. Механічні характеристики

#### 6.1.1. Природні електромеханічна і механічна характеристики $\omega = \varphi(I_a)$ , $\omega = \varphi(M_{em})$

Розрахунок характеристик виконується для 4 значень струму якоря  $I_{ai} = (0,25; 0,5; 1,0; 1,25) I_{ан}$  при  $U_1 = U_H$ ,  $R_{дод} = 0$ .

Для ДПС паралельного збудження із стабілізуючою обмоткою розрахунок виконується двічі – при ввімкнутій і вимкнутій стабілізуючій обмотці.

Рекомендується така послідовність обчислень:

– ЕРС обмотки якоря при заданому струмі якоря,  $B$ ,

$$E_{ai} = U_1 - [I_{ai} \cdot (r_a + r_d + r_c + r_k + R_{дод}) + 2]; \quad (6.1)$$

– МРС послідовної обмотки збудження (стабілізуючої),  $A$ ,

$$F_{ci} = I_{ai} \cdot w_c; \quad (6.2)$$

– результуюча МРС електродвигуна,  $A$ ,

$$F_{\Sigma i} = F_{ш} + F_{ci} - F_{qdi}. \quad (6.3)$$

Значення  $F_{qdi}$  можна прийняти рівним,  $A$ ,

$$F_{qdi} \approx F_{qдн} \cdot \frac{I_{ai}}{I_{ан}}. \quad (6.4)$$

За даними розрахунків характеристики неробочого ходу будується залежність  $c\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$ , за якою для кожного значення  $F_{\Sigma i}$  можна знайти відповідну величину  $c\Phi_i$ ;

– кутова швидкість якоря,  $рад/с$ , 
$$\omega_i = \frac{E_{ai}}{c \cdot \Phi_i}; \quad (6.5)$$

– електромагнітний момент,  $Н \cdot м$ , 
$$M_{em_i} = c \cdot \Phi_i \cdot I_{ai}. \quad (6.6)$$

Величина кутової швидкості при ідеальному неробочому ході двигуна і номінальній напрузі,  $рад/с$ ,

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c\Phi_0}. \quad (6.7)$$

Для ДПС послідовного збудження  $\omega_0 = \omega_{0,25}$ .

Розрахунок виконується у табличній формі за табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Результати розрахунку природної механічної характеристики

$I_a^*$	$I_a$	$E_a$	$F_{co}$	$F_\Sigma$	$c\Phi$	$\omega$	$M_{em}$
—	$A$	$B$	$A$	$A$	$Bб$	$рад/с$	$Н\cdot м$
0,25							
0,5							
1	$I_{ан}$	$E_H$	$F_{сн}$		$c\Phi_H$	$\omega_H$	$M_{емн}$
1,25							
$E_{a0} = \quad , B$		$F_{\Sigma 0} = \quad , A$		$c\Phi_0 = \quad , Bб$		$\omega_0 = \quad , рад/с$	

За механічними характеристиками  $\omega = \varphi(M_{em})$  визначається їх жорсткість,  $Нм\cdot с/рад$ ,

$$\beta = \frac{dM_{em}}{d\omega} = \frac{M_{емн}}{\omega_0 - \omega_H}. \quad (6.8)$$

### 6.1.2. Штучні електромеханічна і механічна характеристики

$$\omega = \varphi(I_a, R_{дод}), \quad \omega = \varphi(M_{em}, R_{дод})$$

Для заданих керівником проекту значень частоти обертання ( $n_i = (0,2...0,9)n_H$ ) при номінальному струмі якоря необхідно визначити величину додаткового опору  $R_{дод}$  в колі якоря, що забезпечує точку характеристики з координатами  $(\omega_i, I_{ан}), Om$ ,

$$R_{дод} = \frac{U - \omega_i \cdot c\Phi}{I_{ан}} - R_a. \quad (6.9)$$

Розрахувати за формулами (6.1)–(6.6) штучні (реостатні) електро-механічну  $-\omega = \varphi(I_a, R_{\text{дод}})$  і механічну  $-\omega = \varphi(M_{\text{ем}}, R_{\text{дод}})$  характеристики при  $U_{\text{н}}$  і побудувати на одному графіку з природними характеристиками двигуна.

### **6.1.3. Характеристики при регулюванні кутової швидкості вверх від номінальної**

**Регулювальні характеристики  $\omega = \varphi(F_3)$  при  $I_a = I_{\text{ан}}$  й  $U = U_{\text{н}}$**

За результатами розрахунку на ПЕОМ характеристики намагнічування будуються (рис. 6.1) перехідна характеристика  $B_{\delta} = \varphi(F_{\delta zj})$  і залежності  $B_{\delta} = \varphi(F_{\Sigma})$  та  $c\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$ .

На перехідній характеристиці відкладається відрізок  $\overline{a_{\text{н}}b_{\text{н}}}$ , який дорівнює  $B_{\delta\text{н}}$  при номінальному значенні магнітного потоку, і відрізок  $\overline{a_1b_1}$ , рівний  $B_{\delta 1} = B_{\delta\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} / \omega_{\text{max}}$ . Відрізок  $\overline{a_1a_{\text{н}}}$  перехідної характеристики поділяється на три приблизно рівні ділянки:  $\overline{a_1a_2}$ ,  $\overline{a_2a_3}$ ,  $\overline{a_3a_{\text{н}}}$ .

Для кожної з 4 відзначених точок ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_{\text{н}}$  на рис. 6.1) за залежністю  $B_{\delta} = \varphi(F_{\Sigma})$  визначаються відповідні значення МРС при неробочому ході  $-F_{\Sigma 1}$ ,  $F_{\Sigma 2}$ ,  $F_{\Sigma 3}$ ,  $F_{\Sigma\text{н}}$ , а за характеристикою  $c\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$  – значення  $c\Phi_1$ ,  $c\Phi_2$ ,  $c\Phi_3$ ,  $c\Phi_{\text{н}}$ .

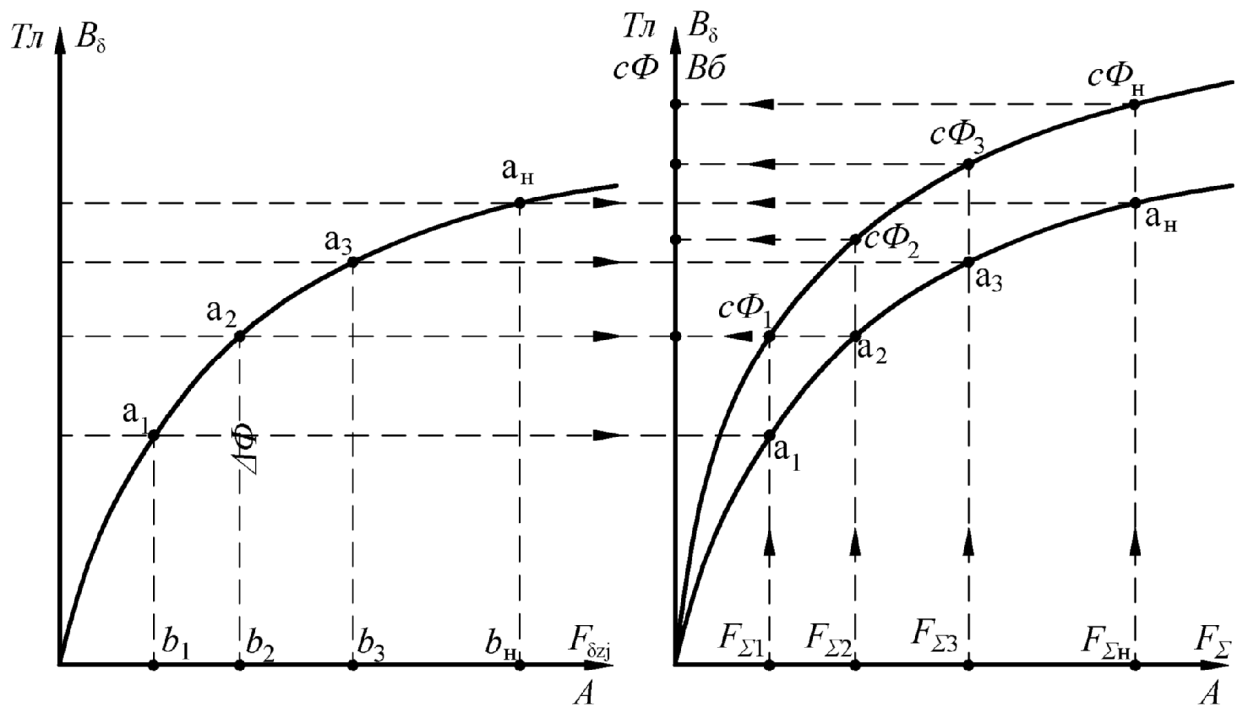


Рис. 6.1. До побудови регулювальних характеристик

Кутова швидкість електродвигуна при обраних значеннях магнітного потоку, який змінюється у заданому діапазоні від  $\Phi_H$  до  $\Phi_{\min}$ , рад/с,

$$\omega_i = E_{aH} / c\Phi_i, \quad (6.10)$$

де  $E_{aH}$  – номінальне значення ЕРС обмотки якоря, В. Значення  $E_{aH}$  постійне, тому що регулювання кутової швидкості електродвигуна ослабленням основного магнітного потоку здійснюється при збереженні номінальних значень  $I_{aH}$  і  $U_H$ .

МРС основних полюсів, А,

$$F_{3i} = F_{шi} + F_c = F_{\Sigma i} + F_{qd_i}, \quad (6.11)$$

де  $F_{qd_i}$  – МРС, еквівалентна дії поля якоря, що розмагнічує, при номінальному струмі якоря і поточному значенні магнітного потоку, А;

$F_{\Sigma i}$  – МРС електродвигуна при неробочому ході, визначаються за значеннями  $c\Phi_i$  з характеристики намагнічування  $c\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$ , А.

**Розрахунок МРС і струмів обмоток збудження виконується за формулами (5.141) ÷ (5.149) залежно від способу збудження ДПС.**

За даними табл. 6.2 будується регулювальна характеристика  $\omega = \varphi(I_3)$ .

За даними остаточного розрахунку на ПК (Додаток Д) наводиться графік регулювальних властивостей ДПС при регулюванні кутової швид-

кості уверх від номінальної (рис. 12.13).

Таблиця 6.2

**Результати розрахунку регулювальної характеристики при ослабленні основного магнітного потоку**

ТОЧКИ	$B_{\delta}$	$F_{\Sigma}$	$F_3$	$F_{ш(с)}$	$c\Phi$	$\omega$	$I_3$
	$T_{л}$	$A$	$A$	$A$	$Bб$	$рад/с$	$A$
$a_1$	$B_{\delta \min}$				$c\Phi_{\min}$	$\omega_{\max}$	$I_{3 \min}$
...							
$a_H$	$B_{\delta H}$		$F_{3H}$		$c\Phi_H$	$\omega_H$	

**6.1.4. Характеристики при регулюванні кутової швидкості униз від номінальної**

Регулювання кутової швидкості униз від номінальної здійснюється зменшенням напруги кола якоря. При цьому електромагнітний момент двигуна з незалежною вентиляцією може залишатися постійним. Для електродвигунів з самовентиляцією (IC01, IC0141) зниження кутової швидкості супроводжується погіршенням охолодження й навантажувальний момент при тривалому режимі роботи на зниженій частоті повинен бути меншим від номінального (рис. 6.2).

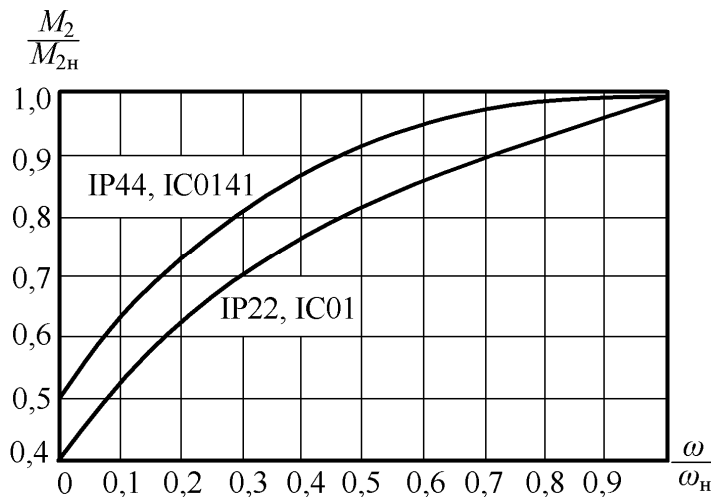


Рис. 6.2.  
Залежність  $M_2/M_{2H} = \varphi(\omega/\omega_H)$

Встановлена у [1] доцільність одночасного зменшення струму якоря й основного магнітного потоку пропорційно  $\sqrt{M_2 / M_{2H}}$ .

Розрахунок регулювальних характеристик виконується для 4 значень кутової швидкості з діапазону  $(\omega_H \dots \omega_{\min})$ , для яких за рис.

**6.2** визначається коефіцієнт зниження навантажувального моменту  $M_2/M_{2H}$  та визначається таке:

– струм якоря,  $A$ ,

$$I_{a_i} = I_{aH} \sqrt{M_2/M_{2H}} ; \quad (6.12)$$

– магнітний потік,  $Bб$ ,

$$c\Phi_i = c\Phi_H \sqrt{M_2/M_{2H}} ; \quad (6.13)$$

– ЕРС якоря,  $B$ ,

$$E_{a_i} = c\Phi_i \cdot \omega_i ; \quad (6.14)$$

– напруга на ОЯ,  $B$ ,

$$U_i = E_{a_i} + I_{a_i} (r_a + r_{дп} + r_c + r_{ко}) + 2 ; \quad (6.15)$$

– МРС основних полюсів,  $A$ ,

$$F_{3_i} = F_{ш_i} + F_c = F_{\Sigma i} + F_{qd_i} , \quad (6.16)$$

де  $F_{qd_i} = F_{qd_H} \cdot I_{a_i}/I_{aH}$ ,  $A$ ;

$F_{\Sigma i}$  визначається за значеннями  $c\Phi_i$  з характеристики намагнічування  $c\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$ .

Розрахунок МРС обмоток збудження виконується за формулами (5.304)...(5.317) залежно від способу збудження ДПТ.

**Розрахунки виконуються у табличній формі – табл. 6.3.**

За даними розрахунку будуються характеристики  $U = \varphi(\omega)$ ,  $I_3 = \varphi(\omega)$ .

**Таблиця 6.3**

**Дані розрахунку характеристик при регулюванні кутової швидкості униз від номінальної**

$\omega_i$	$\frac{M_2}{M_{2H}}$	$I_{a_i}$	$c\Phi_i$	$E_{a_i}$	$U_i$	$F_{\Sigma i}$	$F_{3_i}$	$F_{c_i}$	$F_{ш_i}$	$I_{3_i}$
$\frac{рад}{с}$	-	$A$	$Bб$	$B$	$B$	$A$	$A$	$A$	$A$	$A$
$\omega_H$	1	$I_{aH}$	$c\Phi_H$	$E_{aH}$	$U_H$	$F_{\Sigma H}$	$F_{3H}$			$I_{3H}$
...										
$\omega_{min}$							$F_{3min}$			$I_{3min}$



## 6.2. Аналіз магнітного поля при перевантаженні

ДПС допускають короткочасне перевантаження по струму  $I_{a \max} = 1,5I_{ан}$ . У той самий час струм обмежений значенням реактивної ЕРС. Тому спочатку необхідно визначити відношення

$$k_p = e_{p \text{ доп}} / e_p, \quad (6.17)$$

де  $e_{p \text{ доп}}$  – припустиме значення реактивної ЕРС за табл. 5.35,  $B$ ;

$e_p$  – середнє значення ЕРС секції, що комутується, за даними розрахунку комутаційних параметрів при номінальній частоті обертання,  $B$ .

$$\text{Якщо } k_p \geq 1,5 \text{ то } I_{a \max} = 1,5I_{ан}, \quad (6.18)$$

$$\text{а якщо } k_p < 1,5, \text{ то } I_{a \max} = k_p \cdot I_{ан}. \quad (6.19)$$

При цьому лінійне навантаження якоря,  $A/m$ ,

$$A_2 = A_H \cdot \frac{I_{a \max}}{I_{ан}} \quad (6.20)$$

і поперечне поле якоря може привести до перекидання магнітного поля під полюсом.

МРС якоря на краю полюсної дуги,  $A$ ,

$$F_{ap2} = 0,5A_2 \cdot b_p \cdot 10^{-3}. \quad (6.21)$$

На рис. 6.3 представлені перехідні характеристики за умови перекидання магнітного поля [9]. Середнє значення індукції в повітряному зазорі ( $Tл$ ) можна визначити, відклавши по осі абсцис відрізок  $OA' = OA$ .

$$B_{\delta \text{ ср}} = \frac{1}{6} (B'_{\delta} + B''_{\delta} + 4B'''_{\delta}) = \frac{1}{6} (\overline{A'B'} + \overline{FD} + 4\overline{KL}). \quad (6.22)$$

Для одержання значення індукції  $B'''_{\delta}$  необхідно відрізок  $A'F$  (рис. 6.3) розділити навпіл ( $A'K = KF = A'F/2$ ).

Магнітний потік при перевантаженні,  $Wб$ ,

$$\Phi_2 = B_{\delta \text{ ср}} \cdot \frac{F_{12}}{F_{ap2}} \cdot b_p \cdot l_p \cdot 10^{-6}. \quad (6.23)$$

Зменшення магнітного потоку при перевантаженні,  $B\delta$ ,

$$-\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi_2 = B_{\delta 0} \cdot \left( 1 - \frac{B_{\delta \text{сеп}}}{B_{\delta 0}} \cdot \frac{F_{12}}{F_{\text{ap}2}} \right) \cdot b_p \cdot l_p \cdot 10^{-6}. \quad (6.24)$$

МРС, еквівалентна розмагнічувальній дії поля якоря при перевантаженні,  $A$ ,

$$F_{qd2} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\overline{BC} - \overline{DE}}{\overline{BC} + \overline{DE}} \cdot 2F_{\text{ap}2}. \quad (6.25)$$

Для усунення перекидання магнітного поля збільшимо МРС  $F_{12}$  з урахуванням  $F_{qd2}$

$$F'_{12} = F_{12} + F_{qd2}. \quad (6.26)$$

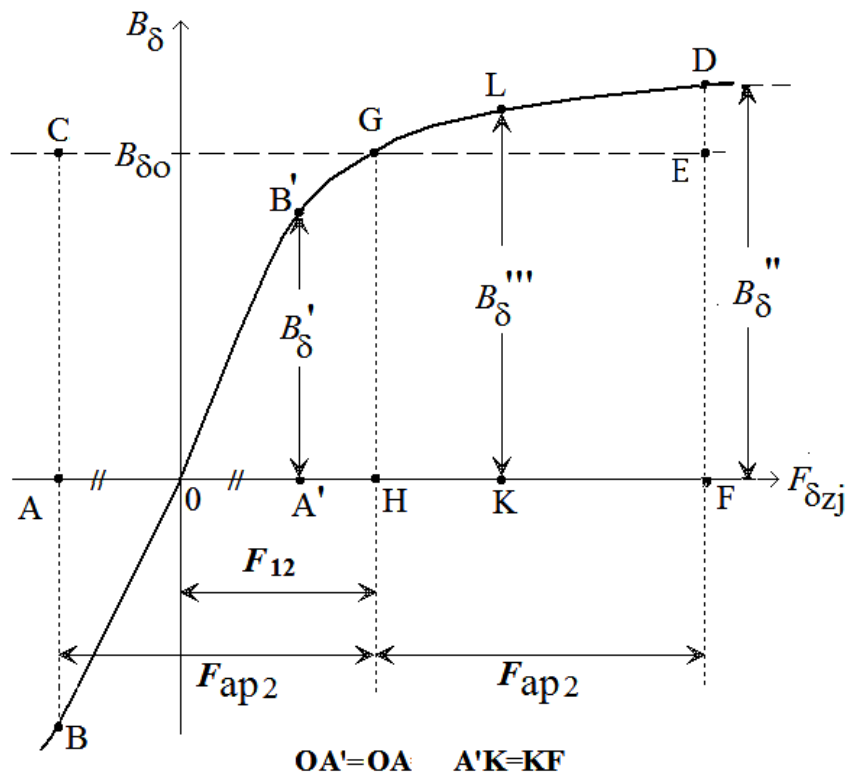


Рис. 6.3. До розрахунку зменшення магнітного потоку

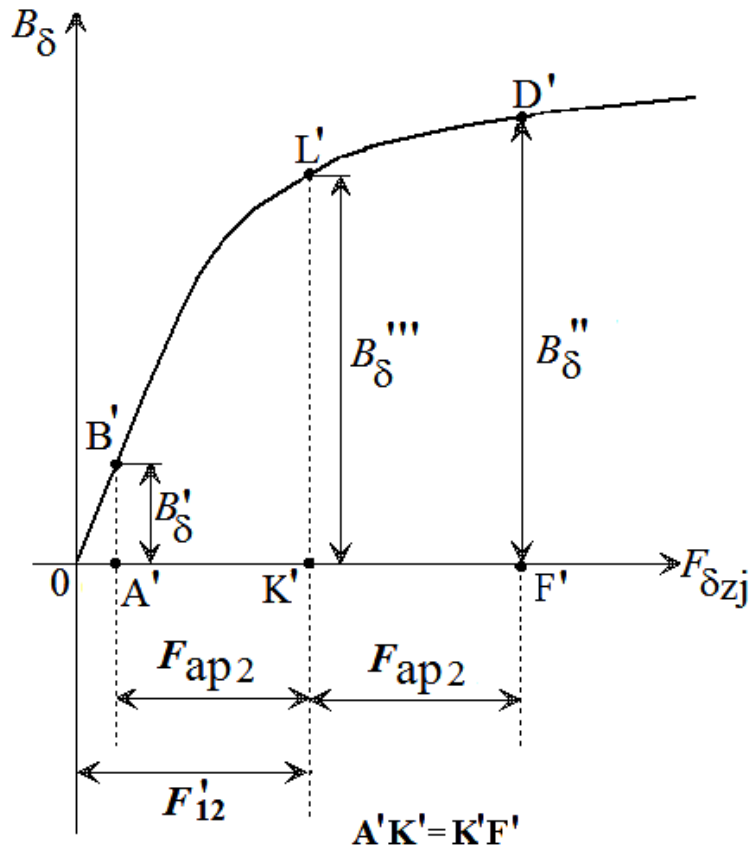


Рис. 6.4. До розрахунку збільшення магнітного потоку

Для визначення ефекту від збільшення МРС необхідно перебудувати рис. 6.3 з урахуванням  $F'_{12}$  та визначити за перехідною характеристикою значення індукції в зазорі під краями головного полюса (рис. 6.4).

Середнє значення індукції в зазорі (рис. 6.4),  $T_l$ ,

$$B'_{\delta\text{сер}} = \frac{1}{6} (B'_{\delta} + B''_{\delta} + 4B'''_{\delta}) = \frac{1}{6} (\overline{A'B'} + \overline{F'D'} + 4\overline{K'L'}). \quad (6.27)$$

Магнітний потік при перевантаженні з урахуванням  $F_{qd2}$ ,  $B\delta$ ,

$$\Phi'_2 = B'_{\delta\text{сер}} \cdot b_p \cdot l_p \cdot 10^{-6}. \quad (6.28)$$

Збільшення магнітного потоку, обумовлене збільшенням МРС ОЗ,  $B\delta$ ,

$$+\Delta\Phi = \Phi'_2 - \Phi_2. \quad (6.29)$$

При значній (більшій ніж 10 %) відмінності величин  $-\Delta\Phi$  й  $+\Delta\Phi$  необхідно скорегувати величину

$$F'_{qd} \approx F_{qd} \frac{B\delta_0}{B'\delta_{сер}} \quad (6.30)$$

й заново визначити збільшення магнітного потоку.

Якщо задати значення струму  $I_a = 0,5(k_r + 1) \cdot I_{ан}$  й виконати розрахунок  $F_{qd}$  за формулами (6.20)–(6.29), то можна розрахувати за п. 5.12.1 МРС збудження для значень струму якоря  $I_a = 0,5(k_r + 1) \cdot I_{ан}$  і  $I_a = k_r \cdot I_{ан}$  (табл. 6.4) і побудувати залежність  $F_3 = \varphi(I_a)$ . Значення  $F_{qd_н}$ ,  $F_{3н}$  приймаються з електромагнітного розрахунку двигуна.

Таблиця 6.4

Результати розрахунку МРС збудження

$I_a, A$	$I_{ан}$	$0,5(k_r + 1) \cdot I_{ан}$	$k_r \cdot I_{ан}$
$F_{qd}, A$	$F_{qd_н}$		$F_{qd2}$
$F_3, A$	$F_{3н}$		

### 6.3. Розрахунок постійних часу

#### *Розрахунок постійної часу обмотки збудження*

За даними розрахунків магнітного кола будується залежність результуючого потоку  $\Phi_\Sigma$  від струму збудження  $I_3$ . Для цього будують графік потоку у робочому повітряному зазорі  $\Phi = \varphi(I_3)$  та залежність потоку розсіяння  $\Phi_\sigma$  від струму збудження  $I_3$ , приймаючи коефіцієнт розсіяння  $\sigma = 1, 2$ . Залежність  $\Phi_\Sigma = \varphi(I_3)$  будують за допомогою графічного підсумовування кривих  $\Phi = \varphi(I_3)$  і  $\Phi_\sigma = \varphi(I_3)$  (рис. 6.5).

На характеристиці  $\Phi_{\Sigma} = \varphi(I_3)$  вибирають 5 точок: одну на прямолінійній частині характеристики, другу на коліні характеристики, а інші – у зоні насичення (орієнтовне положення точок показано на рис. 6.5).

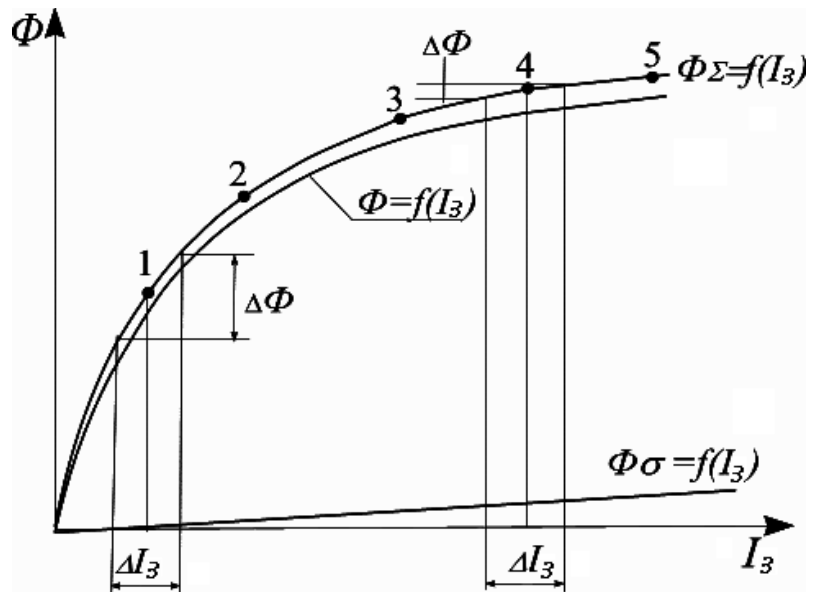


Рис. 6.5. Залежність  $\Phi_{\Sigma} = f(I_3)$

Для кожної точки, задавши однаковими значення  $\Delta I_3$ , визначають збільшення повного потоку  $\Delta\Phi$  (рис. 6.5).

Індуктивність ОЗ у кожній точці,  $G_n$ ,

$$L_{B_i} = \Delta\psi_i / \Delta I_{3_i} = 2 \cdot p \cdot w_3 \cdot \Delta\Phi_i / \Delta I_{3_i}, \quad (6.31)$$

де  $w_3$  – число витків у котушці ОЗ.

За результатами розрахунків будують залежність  $L_3 = \varphi(I_3)$  (Додаток Д, рис. Д.15).

При відомому опорі ОЗ для  $115^\circ\text{C}$  –  $r_{3115}$  визначають значення електромагнітної постійної часу ОЗ у точках 1...5, с,

$$T_{3_i} = k_{\text{вс}} \cdot L_{3_i} / r_{3115}, \quad (6.32)$$

де  $k_{\text{вс}} \approx 1,2$ , що враховує дію вихрових струмів.

### **Розрахунок електромагнітної постійної часу кола якоря**

Електромагнітна постійна часу кола якоря, с,

$$T_a = L_a / R_a, \quad (6.33)$$

де  $L_a$ ,  $R_a$  – індуктивність ( $G_n$ ) і активний опір ( $Om$ ) кола якоря, включаючи обмотку додаткових полюсів і компенсаційну.

Приблизно  $L_a$  можна визначати,  $\Gamma_H$ ,

$$L_a \approx \frac{\mu_0}{24} \cdot \left( \frac{N_a}{2 \cdot a \cdot p} \right)^2 \cdot \alpha_\delta^3 \cdot \frac{\pi \cdot D_a \cdot l_\delta}{2 \cdot \delta} \cdot 10^{-3}. \quad (6.34)$$

У формулі (6.31) усі лінійні розміри в *мм*.

### **Розрахунок електромеханічної постійної часу**

Момент інерції якоря,  $кг \cdot м^2$ ,

$$J_a \approx 0,635 \cdot D_a^4 \cdot (l_a + 0,3 \cdot D_a + 7,5 \cdot P_{2H}) \cdot 10^{-12}, \quad (6.35)$$

де  $D_a$ ,  $l_a$  [*мм*],  $P_{2H}$  [*кВт*].

Електромеханічна постійна часу, *с*,

$$T_M = J_a \cdot \frac{\omega_0}{M_{кз}} \approx J_a \cdot \frac{R_a}{(c \cdot \Phi_H)^2} = J_a \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot a^2 \cdot R_a}{p^2 \cdot N_a^2 \cdot \Phi_H^2}. \quad (6.35)$$

Для ДПС потужністю (1...10) *кВт* механічна постійна часу орієнтовно дорівнює (0,03...0,05) *с*, при потужності до 1000 *кВт* – (0,5...1) *с*.

## **6.4. Розрахунок характеристик на ПЕОМ**

Розрахунок характеристик виконується після повного розрахунку двигуна (Додаток Д, розд. Д.4, рис. Д.5...Д.15).

## **7. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ**

### **Технічне завдання на проектування**

Завдання на проектування ТЕД містить такі основні величини:

- потужність номінального (часового) режиму, *кВт*, або маса транспортного засобу, *т*;
- напруга контактної мережі, *В*;
- номінальна швидкість екіпажа, *км/год*;
- максимальна швидкість екіпажа, *км/год*;
- діаметр колеса транспортного засобу, *м*;
- спосіб збудження ТЕД;

- кратність МРС обмоток послідовного та паралельного збудження;
- клас нагрівостійкості ізоляції; (конструктивне виконання за ступенем захисту від навколишнього середовища (IP) і способом охолодження (IC).

## 7.1. Визначення діаметра якоря

### 7.1.1. Розрахунок параметрів редуктора

Передаточне число ( $\mu$ ) – відношення числа зубів веденого зубчастого колеса до зубів ведучої шестірні [4; 13]

$$\mu = 3,6 \frac{g_{a \max} \cdot D_K}{g_{k \max} \cdot D_a}, \quad (7.1)$$

де  $D_K, D_a$  – діаметр колеса і якоря тягового двигуна, мм;

$g_{k \max}$  – максимальна швидкість екіпажа, км/год;

$g_{a \max}$  – припустима швидкість на поверхні якоря тягового двигуна, м/с.  $g_{a \max} \approx 70$  м/с.

#### **При опорно-осьовій підвісі:**

$\mu = (3,5 \dots 4,6)$  – для електровозів, тепловозів, моторних вагонів;

$\mu = (11 \dots 15)$  – для шахтних електровозів з двоступеневим редуктором.

#### **При опорно-рамній (поперечно-незалежній) підвісі:**

$\mu = (3,5 \dots 5)$  – для двигунів приміських поїздів і метрополітену;

$\mu = (5 \dots 7)$  – для двигунів міського транспорту.

#### **При опорно-рамній (поздовжньо-незалежній) підвісі:**

$\mu = (7 \dots 8)$  – для двигунів трамваїв;

$\mu \approx (10 \dots 12)$  – для двигунів тролейбусів при двоступеневому редукторі.

Номінальна швидкість екіпажа  $g_{KH} = 3,6 \frac{\pi \cdot D_K}{60} \cdot \frac{n_H}{\mu} \cdot 10^{-3}$ , звідки

номінальна частота обертання двигуна, об/хв.,

$$n_H = \frac{60 \cdot 10^3}{3,6 \cdot \pi} \cdot \frac{\mu}{D_K} \cdot g_{KH} = 5300 \cdot \frac{\mu}{D_K} \cdot g_{KH}. \quad (7.2)$$

Діаметр колеса транспортного засобу можна прийняти:

– для двигунів тролейбусів  $D_K = 850$  мм; вагонів трамваїв  $D_K = 710$  мм;

– метрополітену  $D_K = 900$  мм;

– приміських електропоїздів, промислових електровозів і тепловозів

$$D_K = 1\ 050\ \text{мм};$$

– магістральних електровозів  $D_K = 1\ 250\ \text{мм}$ .

Номінальний момент на валу електродвигуна,  $H \cdot м$ ,

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{P_H}{n_H} \cdot 10^3. \quad (7.3)$$

Якщо номінальна потужність ТЕД ( $P_H$ ) не задана у вхідних даних на проектування, вона може бути визначена за умови, що потужність всіх ТЕД транспортного засобу дорівнює,  $кВт$ ,

$$\Sigma P_H \approx (6 \dots 8) \cdot m_H, \quad (7.4)$$

де  $m_H$  – маса навантаженого ЕРС,  $т$ .

Для тролейбусів  $m_H \approx 19\ т$ ; для трамваїв  $m_H \approx 26$ .

Маса ТЕД

$$P_H = \Sigma P_{\text{ВО}} / k_{\text{ВО}}, \quad (7.5)$$

де  $k_{\text{ВО}}$  – кількість ведучих осей транспортного засобу.

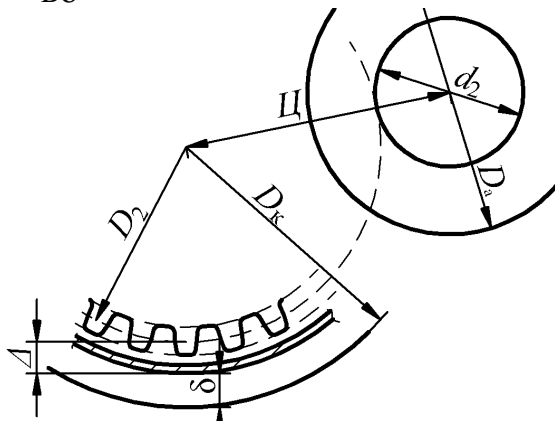


Рис. 7.1.  
Ділильні окружності  
колеса та шестерні

Діаметр ділильної окружності зубчастого колеса (рис. 7.1),  $мм$ ,

$$D_2 = D_K - 2(b + \Delta), \quad (7.6)$$

де  $b$  – відстань від нижньої точки кожуха редуктора до головки рельсу:

$b \geq 120\ \text{мм}$  – для магістрального транспорту;  $b \geq 110\ \text{мм}$  – для трамваїв;  $b \geq 95\ \text{мм}$  – для метро;  $b \geq (50 \dots 100)\ \text{мм}$  – для шахтних електровозів;

$\Delta = (17 \dots 25)\ \text{мм}$  – відстань між ділильною окружністю колеса й нижньою точкою кожуха редуктора.

Число зубів веденого колеса

$$Z_K = \frac{D_2}{m} \cos \psi, \quad (7.7)$$

де  $m$  – модуль ( $мм$ ) зубчастої передачі визначається за залежністю



$m = \varphi(M_H)$  на рис. 7.2;

$\psi$  – кут спіралі зубчастих коліс. Для прямозубих коліс  $\psi = 0$ , для косозубих, що забезпечують більш плавне зчеплення,  $\psi = (8...20)^\circ$ .

Діаметр ділильної окружності шестерні ( $d_2$ , мм) визначається за графіком  $d_2 = \varphi(M_H)$ , наведеним на рис. 7.3.

Число зубів ведучої шестерні

$$z_{III} = \frac{d_2}{m}. \quad (7.8)$$

$Z_K$  і  $z_{III}$  повинні бути взаємно простими числами.

Централь передачі (рис. 7.1) при прямих зубах, мм,

$$Ц = \frac{m}{2} (1 + Z_K + z_{III}), \quad (7.9)$$

при спіральних зубах

$$Ц = \frac{m}{2} [1 + (Z_K + z_{III}) / \cos \psi]. \quad (7.10)$$

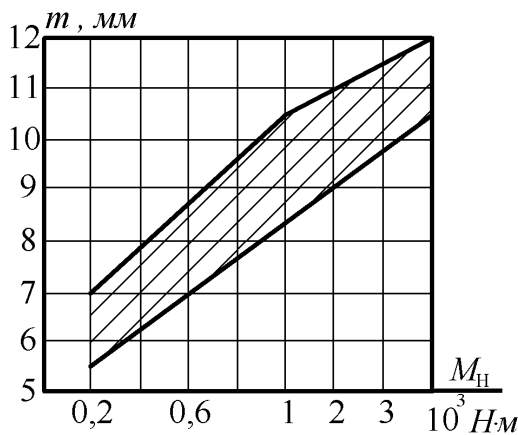


Рис. 7.2. Залежність  $m = \varphi(M_H)$

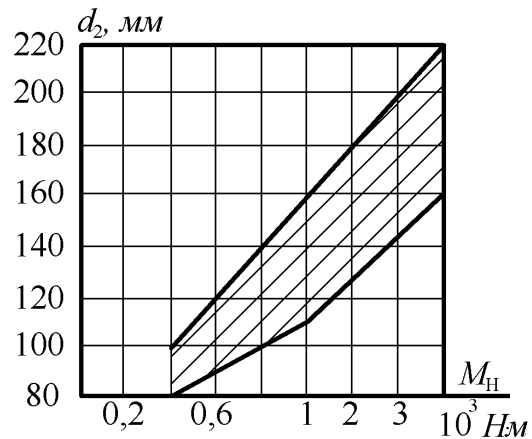


Рис. 7.3. Залежність  $d_2 = \varphi(M_H)$

Після розрахунку параметрів редуктора уточнюються значення:

– передатного відношення

$$\mu = Z_K / z_{III}; \quad (7.11)$$

– номінальної частоти обертання двигуна за формулою (7.2) та номінального моменту на валу електродвигуна за формулою (7.3);

– номінальна напруга живлення ТЕД, В,

$$U_H = U_c / k_{II}, \quad (7.12)$$

де  $k_{II}$  – кількість послідовно з'єднаних ТЕД однієї гілки.

### 7.1.2. Розрахунок діаметра якоря

Діаметр якоря тягового електродвигуна, мм,

$$D_a = k_a \cdot 3 \sqrt{\frac{P_H}{n_H}}, \quad (7.13)$$

де  $k_a = (650 \dots 750)$  для ТЕД з ізоляцією класу нагрівостійкості **B**;

$k_a = (600 \dots 670)$  для ТЕД з ізоляцією класу нагрівостійкості **H**.

Значення діаметра якоря вибирається з ряду стандартних значень:

$$D_a = 167, 182, 195, 210, 218, 245, 280, 293, 327, \\ 368, 423, 493, 560, 660, 740, 850, 990 \text{ мм.}$$

Величина діаметра якоря ТЕД знаходиться у таких межах:

– для двигунів тролейбусів, вагонів трамваїв і метрополітену діаметр якоря тягового електродвигуна  $D_a = (220 \dots 330)$  мм;

– для приміських електропоїздів, промислових електровозів і тепловозів –  $D_a = (420 \dots 520)$  мм;

– для магістральних електровозів –  $D_a = (620 \dots 740)$  мм.

При **поперечному** розташуванні ТЕД щодо осі транспортного засобу діаметр якоря обмежується центральною редуктора. Розраховане за формулою (7.13) значення діаметра якоря ТЕД для вагонів міського електротранспорту при незалежній підвісці з передачею через карданну муфту повинне задовольняти умову

$$D_a \leq (0,9 \dots 1,5) D_c. \quad (7.14)$$

Для потужних ТЕД з осьовою підвіскою приміських електропоїздів при  $2p = 4$

$$D_a \leq (1,05 \dots 1,16) D_c, \quad (7.15)$$

при  $2p = 6$

$$D_a \leq (1,16 \dots 1,2) D_c. \quad (7.16)$$

Зовнішній діаметр тягового двигуна, мм,

$$D_H = k_d \cdot D_a = (1,5 \dots 1,8) \cdot D_a. \quad (7.17)$$

Максимальна частота обертання двигуна, об/хв,

$$n_{\max} = n_H \cdot \frac{g_{k_{\max}}}{g_{k_H}}. \quad (7.18)$$

Максимальна лінійна швидкість на поверхні якоря ТЕД, м/с,

$$\mathcal{G}_{a_{\max}} = n_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{60} \cdot 10^{-3}. \quad (7.19)$$

Значення  $\mathcal{G}_{a_{\max}}$  не повинне перевищувати припустиме значення лінійної швидкості на поверхні якоря за умовою комутації та механічної міцності колектора  $\mathcal{G}_{a_{\max}} \leq 60 \text{ м/с}$ .

Кратність регулювання частоти обертання двигуна уверх від номінальної зменшенням магнітного потоку

$$n_{\max}^* = n_{\max} / n_H. \quad (7.20)$$

*Далі виконується електромагнітний розрахунок ТЕД за розд. 5.*

## 7.2. Аналіз характеристик тягового двигуна

### 7.2.1. Характеристики на ободі колеса

Залежність швидкості руху  $\mathcal{G}_K$ , сили тяги на ободі колісної пари  $F_K$  і ККД  $\eta_K$  від струму електродвигуна  $I_a$  при незмінній напрузі та постійній температурі обмоток тягових електродвигунів називають електромеханічними характеристиками, віднесеними до обода колеса (рис. 7.4). Їх розраховують при робочій температурі обмоток (115°С).

При виконанні розрахунків припускаємо, що показники номінального режиму розраховані, відомі магнітна характеристика і параметри двигуна.

Можна скористатися універсальною магнітною характеристикою машин постійного струму (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Універсальна магнітна характеристика

$\Phi, \%$	0	40	70	90	100	110	120	125
$F, \%$	0	25	50	75	100	150	225	275

Втрати в передачі приймаються з табл. 7.2 залежно від завантаження тягового двигуна.

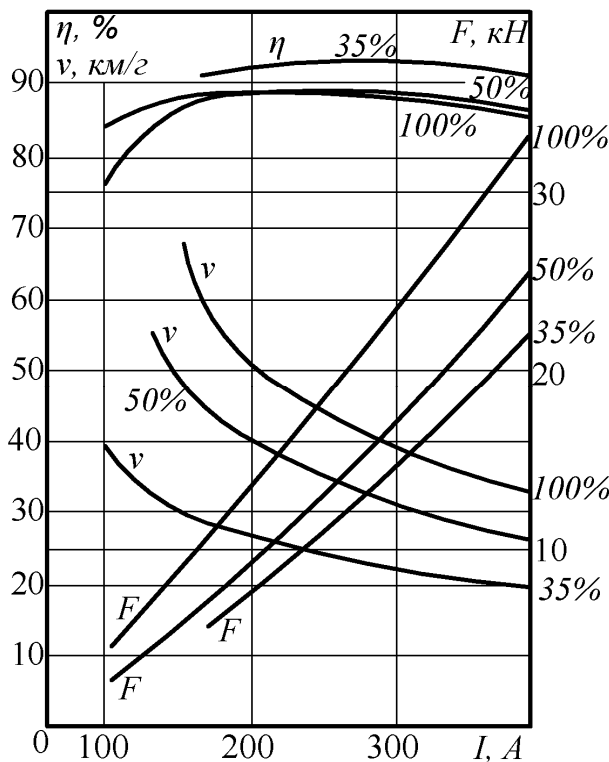


Рис. 7.4.  
Електромеханічні  
характеристики  
ТЕД ДК-211А

Таблиця 7.2

Втрати в одноступінчастій циліндричній зубчастій передачі

$P_1/P_H \cdot 100, \%$	200	150	125	100	75	60	50	40	30	25
$\Delta p_{II}^*, \%$	3,5	3,0	2,7	2,5	2,5	2,7	3,2	4,4	6,7	8,5

Додаткові втрати ТЕД розраховуються через основні втрати в сталі (табл. 7.3).

Таблиця 7.3

До розрахунку додаткових втрат

$I_a/I_{ан}$	0,5	1	1,5	2
$\Delta p_{дод}/\Delta p_c$	0,27	0,3	0,45	0,65

Розрахунок характеристик на валу ТЕД ( $n, M, \eta_d, M_2 = \varphi(I_a)$ ) і на ободі колеса  $\mathcal{G}_k, F_k, \eta_k = \varphi(I_a)$  (рис.7.4) виконується для декількох значень магнітного потоку (частіше трьох) – повного поля (100 % магнітного потоку) і ослабленого поля (50 і 35 % потоку).

За необхідності розрахунки виконуються для різних значень напруги живлення.

Розрахунок ведеться в табличній формі для значень струму якоря  $I_a = (0.3, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2) I_{ан}$  за таким алгоритмом.

1.  $E_a = U_d - I_a R_a - 2\Delta U_{ш}, B.$
2.  $F_B = F_{ш} + F_c, A.$
3.  $F_{qd} = F_{qd_H} (I_a / I_{aH}), A.$
4.  $F_{\Sigma} = F_B - F_{qd}, A.$
5.  $\Phi(F_{\Sigma}), Bб.$
7.  $n = \frac{60a}{p \cdot N_a} \cdot \frac{E_a}{\Phi}, \text{об/хв.}$
7.  $\Delta p_{\text{эа}} = I_a^2 \cdot R_a, Bm.$
8.  $\Delta p_c = \Delta p_{cH} \left(\frac{\Phi}{\Phi_H}\right)^2 \left(\frac{n}{n_H}\right)^{1,5}, Bm.$
9.  $(\Delta p_{тщ} + \Delta p_{\Pi}) \cdot \left(\frac{n}{n_H}\right), Bm.$
10.  $\Delta p_{\text{вент}} = \Delta p_{\text{вент}_H} \cdot \left(\frac{n}{n_H}\right)^3, Bm.$
11.  $\Delta p_{\text{доД}}, Bm.$
12.  $\Sigma \Delta p, Bm.$
13.  $P_2 = U_d \cdot I_a - \Sigma \Delta p, Bm.$
14.  $\eta_d = P_2 / (U_d \cdot I_a).$
15.  $M = 9,55 P_2 / n, H \cdot m.$
16.  $\mathcal{G}_k = 0,189 \cdot n_d \cdot D_k \cdot 10^{-3} / \mu, \text{км/год.}$
17.  $\Delta p_{\Pi}^*$
18.  $\eta_k = \eta_d - \Delta p_{\Pi}^* / 100.$
19.  $F_k = 2M \cdot \mu \cdot \eta_k \cdot 10^3 / D_k, H.$

За наведеним алгоритмом розраховується одна точка характеристик на ободі колеса.

Повністю характеристики для трьох значень магнітного потоку розраховуються за програмою «Аналіз тягових електродвигунів» підсистеми розрахунків машин постійного струму (підрозд. Д.5 Додатку Д).

### 7.2.2. Характеристики реостатного пуску

Пуск звичайно здійснюють при постійному середньому струмі в тягових двигунах  $I_{a \text{сер}}$ . При цьому швидкість електрорухомого складу (РС)

$$\mathcal{G}_k = \left[ U_c / n - I_{a \text{сер}} \cdot \left( R_a + \frac{k}{n} R_{\Pi} \right) \right] / c_k \Phi. \quad (7.21)$$

Тут  $\mathcal{G}_k$  – швидкість електрорухомого складу, км/год;

$R_a$  – сумарний активний опір обмоток кола якоря тягового двигуна, який включає опір обмотки якоря  $r_a$ , обмотки послідовного збудження  $r_c$  й додаткових полюсів  $r_d$ , Ом;

$R_{\Pi}$  – опір пускового реостата, Ом;

$n$  – число послідовне з'єднаних ТЕД;

$k$  – число паралельних гілок з тяговими двигунами (для чотиривісно-

го трамвайного вагона  $n = 2$ ,  $k = 2$ );

$\Phi$  – магнітний потік ТЕД;

$c_K$  – коефіцієнт, який залежить від конструктивних параметрів двигуна і редуктора.

$$c_K = \frac{p \cdot N_a}{60 \cdot a} \cdot \frac{60 \cdot \mu \cdot 10^3}{3,6 \cdot \pi \cdot D_K} = \frac{p \cdot N_a \cdot \mu}{11,3 \cdot a \cdot D_K} \cdot 10^3 = 88,5 \frac{p \cdot N_a \cdot \mu}{a \cdot D_K}, \quad (7.22)$$

де  $p$  – число пар полюсів ТЕД;

$N_a$ ,  $a$  – число провідників і число пар паралельних гілок ОЯ;

$\mu$  – передатне відношення редуктора;

$D_K$  – діаметр колеса транспортного засобу, мм.

Найбільшу силу тяги  $F_M$  визначають за заданим найбільшим середнім прискоренням,  $H$ .

$$F_M = \left[ 1000 (1 + \gamma_H) \cdot \alpha_{\text{сер}} + \varepsilon_H \right] \cdot m_H / (k + n), \quad (7.23)$$

де  $\alpha_{\text{сер}}$  – найбільше середнє прискорення,  $m/c^2$ ;

$\gamma_H$  – коефіцієнт інерції оберткових частин нормально навантаженого РС;  $\gamma_H = (0,1 \dots 0,14)$  – для трамвайних вагонів,  $\gamma_H = (0,1 \dots 0,12)$  – для тролейбусів;

$\varepsilon_H$  – середній питомий опір руху за час реостатного пуску. У розрахунках орієнтовно можна прийняти:

$\varepsilon_H = 120 H / m$  – для тролейбусів;  $\varepsilon_H = 50 H / m$  – для трамвайних вагонів;

$(k + n)$  – загальне число підключених ТЕД.

Використовуючи характеристики сили тяги двигуна ( $F(I)$  на рис. 7.4, за значенням  $F_M$  визначають середній пусковий струм  $I_{a \text{ сер}}$ .

При розрахунках реостатного пуску звичайно задають значення коефіцієнта нерівномірності по струму  $k_j$ , який характеризує коливання пускового струму при перемиканні ступенів пускового реостата. Значення коефіцієнта  $k_j$  вибирають залежно від прискорення  $\alpha_{\text{сер}}$  (табл. 7.4)

Таблиця 7.4

### Коефіцієнт пульсації струму

$\alpha_{\text{сер}}, \text{ м / с}^2$	0,7 ... 0,8	1,0 ... 1,2	1,3 ... 1,6
$k_i$	0,1 ... 0,2	0,08 ... 0,16	0,07 ... 0,1

За значенням середнього пускового струму  $I_{\text{ап}}$  і коефіцієнта нерівномірності  $k_i$  визначають максимальний і мінімальний струми:

$$I_{\text{max}} = I_{\text{а сер}} \cdot (1 + k_i); \quad (7.24)$$

$$I_{\text{min}} = I_{\text{а сер}} \cdot (1 - k_i). \quad (7.25)$$

Значення  $I_{\text{max}}$ , обчислене за формулою (7.24), не повинне перевищувати струм ТЕД, припустимий за умовами комутації, а сила тяги  $F_{\text{max}}$ , якій відповідає струм  $I_{\text{max}}$ , не повинна перевищувати значення, припустиме за умовами зчеплення коліс.

За значеннями  $I_{\text{max}}$  і  $I_{\text{min}}$  будують пускову діаграму.

Залежність опору пускового реостата, приведенного до одного двигуна, від швидкості з рівняння (7.21)

$$R_{\text{пi}} = \frac{U_{\text{с}}/n - c_{\text{к}} \cdot \Phi \cdot \mathcal{G}_{\text{к}}}{I_{\text{а}}} - R_{\text{а}}. \quad (7.26)$$

При постійному пусковому струмі  $I_{\text{а}}$  залежність  $R(\mathcal{G})$  лінійна. Для кожного значення  $I_{\text{аi}}$  можна побудувати залежність  $R_i(\mathcal{G})$  по двом точкам з координатами:

$$R_{\text{пi}} = 0 \rightarrow \mathcal{G}_{\text{ки}} = \frac{U_{\text{с}}/n - I_{\text{аi}} \cdot R_{\text{а}}}{c_{\text{к}} \cdot \Phi}; \quad (7.27)$$

$$\mathcal{G}_{\text{к}} = 0 \rightarrow R_{\text{пi}} = \frac{U_{\text{с}}/n}{I_{\text{аi}}} - R_{\text{а}}.$$

Тут  $\mathcal{G}_{\text{ки}}$  – швидкість виходу на природну характеристику при струмі  $I_{\text{аi}}$ .

На рис. 7.5 показані залежності  $R_i(\mathcal{G})$  для струмів  $I_{\text{а4}} > I_{\text{а3}} > I_{\text{а2}} > I_{\text{а1}}$ . Для побудови реостатної характеристики  $\mathcal{G}(I_{\text{а}})$  при деякому значенні опору  $R_i$  необхідно в лівому квадранті системи ко-

ординат провести вертикаль через точку  $R_i$  і точки перетинання 1, 2, 3, 4 цієї вертикалі з характеристиками  $R_i(\mathcal{G})$  перенести паралельно горизонтальній осі на відповідні вертикалі в правому квадранті, проведені через точки  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{a3}$  і  $I_{a4}$ . З'єднуючи між собою точки 1', 2', 3', 4', одержуємо штучну характеристику  $\mathcal{G} = \varphi(I_a, R_i)$ . Аналогічно будується реостатна характеристика при будь-якому значенні  $R_{\Pi i}$ .

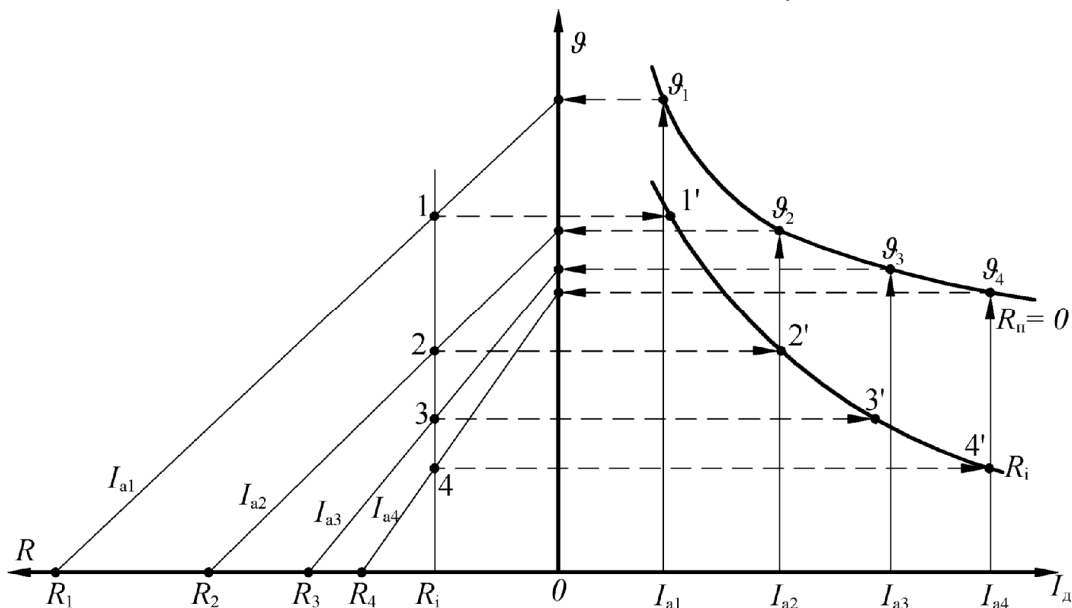


Рис. 7.5. Побудова реостатних характеристик

На рис. 7.6 наведена побудова східчної пускової діаграми. У правій частині рис. 7.6 проведено дві вертикалі через точки  $A'(I_{\min})$  й  $C'(I_{\max})$  до перетинання з природною характеристикою в точках  $B'$ ,  $D'$ .

Опори пускових реостатів, які відповідають струмам  $I_{\min}$  та  $I_{\max}$ , визначають з формули (7.27) при  $\mathcal{G}=0$

$$R_A = \frac{U_c/n}{I_{\min}} - R_a; \quad R_C = \frac{U_c/n}{I_{\max}} - R_a. \quad (7.28)$$

Характеристики  $R_A(\mathcal{G})$  й  $R_C(\mathcal{G})$  на рис. 7.6 проведені через точки  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,  $D$ . Між характеристиками  $R_A(\mathcal{G})$  й  $R_C(\mathcal{G})$  вписують східчасту лінію, за допомогою якої одержують (рис. 7.5) точки перетинання 1', 2', 3' залежності  $\mathcal{G}(I_a)$  при струмах  $I_{\min}$  і  $I_{\max}$ , і з'єднують між собою так, як показано на рис. 7.6. Отримана ламана крива є пусковою діаграмою, яка характеризує зміну струму двигуна в процесі пуску в діапазоні швидкості  $0 \leq \mathcal{G} \leq \mathcal{G}_B$ , тобто до виходу на природну характеристику двигуна, яка



відповідає напрузі  $U_c/n$ . Нахилені лінії, укладені між значеннями  $I_{\min}$  та  $I_{\max}$ , є реостатними характеристиками  $\mathcal{G}(I_a)$  при відповідних опорах ступенів пускових реостатів  $R_1$  і  $R_2$  й т. п.

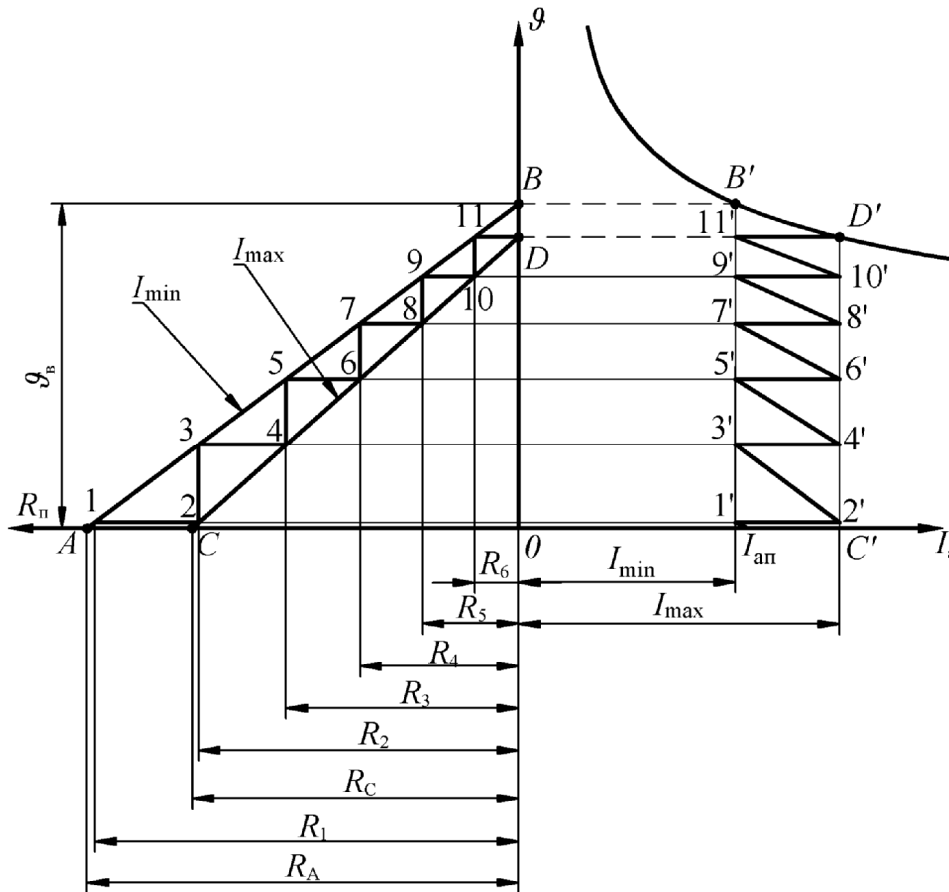


Рис. 7.6. Ступенева діаграма реостатного пуску

### 7.2.3. Характеристики пуску при імпульсному регулюванні напруги

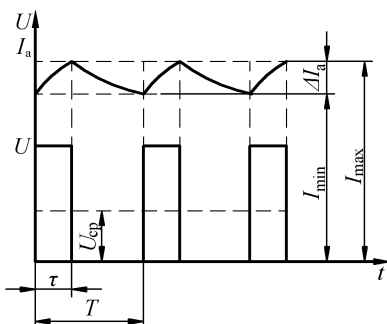


Рис. 7.7. Діаграма зміни струму і напруги

Постійна напруга мережі живлення  $U_c$  перетвориться в послідовність імпульсів з регульованою відносною тривалістю [13]. Середня величина напруги  $U_{cp}$ , яка прикладається до ТЕД, змінюється (рис. 7.7) при зміні співвідношення між тривалістю включеного ( $\tau$ ) і відключеного ( $T - \tau$ ) стану тиристорного ключа.

В інтервалі  $\tau$ , коли ключ включений, до ТЕД прикладається повна напруга мережі  $U_c$ , внаслідок чого струм двигуна збільшується (рис. 7.7).

При вимиканні ключа під час паузи ( $T - \tau$ ) струм двигуна не перери-

вається завдяки енергії, накопиченої в індуктивностях кола навантаження. Частота імпульсів приблизно (200...400) Гц, внаслідок чого період  $T$  на два порядки менший від постійної часу кола якоря. Тому за час імпульсів струм якоря не встигає значно вирости, а за період паузи значно зменшиться. Можливі три варіанти регулювання рівня напруги  $U_{\text{ср}}$ :

- регулювання періоду  $T$ , при сталій тривалості імпульсу  $\tau$  – частотне регулювання;
- зміна тривалості імпульсу  $\tau$  при сталому періоді  $T$  – широтно-імпульсне регулювання;
- з'єднання двох попередніх – комбіноване.

Співвідношення між середніми значеннями струму і напруги на вході та виході перетворювача визначається коефіцієнтом заповнення діаграми

$$\lambda = \frac{\tau}{T} = \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{с}}} \quad (7.29)$$

Частота обертання ТВД

$$n = \frac{\lambda \cdot U_{\text{с}} - I_{\text{а ср}} \cdot R_{\text{а}}}{c_{\text{е}} \cdot \Phi} \quad (7.30)$$

Зміна струму якоря

$$\Delta I_{\text{а}} = I_{\text{макс}} - I_{\text{мін}}, \quad \text{або} \quad (7.31)$$

$$\Delta I_{\text{а}} = \lambda \cdot U_{\text{с}} \cdot (1 - \lambda) / [f \cdot (L_{\text{а}} + L)] \quad (7.32)$$

де  $f$  – частота комутації тиристорного комутатора;  $L_{\text{а}} + L$  – індуктивність якорного кола.

Точки характеристики пуску (рис. 7.8) можна розрахувати виходячи з формули (7.30). При максимальному значенні пускового струму (точка  $i = 1$ ) мінімальне значення  $\lambda_1 = \lambda_{\text{мін}}$  розраховується за форму (7.30) за умови  $n_1 = 0$

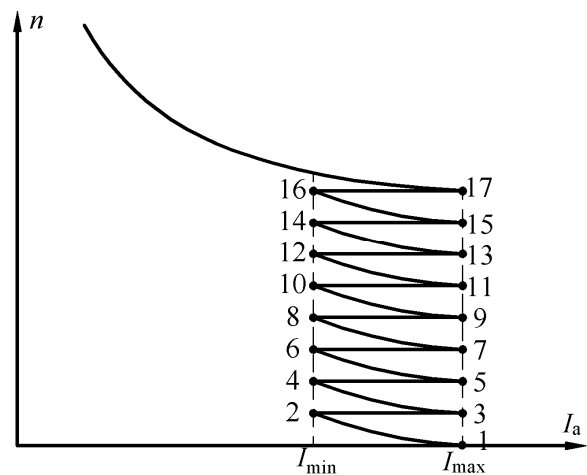


Рис. 7.8. Побудова характеристики пуску

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{мін}} = I_{\text{макс}} \cdot R_{\text{а}} / U_{\text{д}} \quad (7.33)$$

Для парних точок ( $i = 2, 4, 6, 8 \dots$ ) зберігається постійним значення коефіцієнта заповнення діаграми

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} \quad (7.34)$$

і тоді з формули (7.30) частота обертання ГЕД

$$n_i = \frac{\lambda_{i-1} \cdot U_{\text{д}} - I_{\text{min}} \cdot R_{\text{а}}}{c_{\text{е}} \cdot \Phi_{\text{min}}} \quad (7.35)$$

Для непарних точок ( $i = 3, 5, 7, 9 \dots$ ) виконується умова незмінності частоти обертання ГЕД при зміні напруги

$$n_i = n_{i-1}, \quad (7.36)$$

і коефіцієнт заповнення діаграми з формули (7.30)

$$\lambda_i = \frac{n_{i-1} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi_{\text{max}} + I_{\text{max}} \cdot R_{\text{а}}}{U_{\text{д}}} \quad (7.37)$$

Значення струмів  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$  розраховуються за формулами (7.24), (7.25).

Значення  $\Phi_{\text{max}}$ ,  $\Phi_{\text{min}}$  визначаються з магнітної характеристики  $\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$  двигуна за значеннями  $F_{\Sigma\text{max}}$ ,  $F_{\Sigma\text{min}}$ , визначеними з урахуванням способу збудження ГЕД.

Для **послідовного** збудження  $F_{\text{з}} = F_{\text{с}} = F_{\Sigma} + F_{\text{qd}}$  і

$$F_{\Sigma\text{max}} = (F_{\text{с}} - F_{\text{qd}}) \cdot \frac{I_{\text{а max}}}{I_{\text{аН}}}, \quad (7.38)$$

$$F_{\Sigma\text{min}} = (F_{\text{с}} - F_{\text{qd}}) \cdot \frac{I_{\text{а min}}}{I_{\text{аН}}}. \quad (7.39)$$

Для **змішаного** збудження при  $F_{\text{ш}} = \text{const}$  МРС збудження  $F_{\text{з}} = F_{\text{ш}} + F_{\text{с}} = F_{\Sigma} + F_{\text{qd}}$  і

$$F_{\Sigma\text{max}} = F_{\text{ш}} + (F_{\text{с}} - F_{\text{qd}}) \cdot \frac{I_{\text{а max}}}{I_{\text{аН}}}, \quad (7.40)$$

$$F_{\Sigma\text{min}} = F_{\text{ш}} + (F_{\text{с}} - F_{\text{qd}}) \cdot \frac{I_{\text{а min}}}{I_{\text{аН}}}. \quad (7.41)$$

За розрахованими значеннями частоти обертання ГЕД ( $n_i$ ) можна визначити швидкість транспортного засобу, км/год,

$$\mathcal{G}_{K_i} = \frac{0.188 \cdot D_K \cdot 10^{-3}}{\mu} \cdot n_i. \quad (7.42)$$

За даними розрахунку будується східчаста діаграма пуску транспортного засобу з системою імпульсного регулювання (рис. 7.8).

#### 7.2.4. Характеристики при регулюванні збудження двигуна

$$\mathcal{G}_K = \varphi(I_a, \alpha), \quad F_K = \varphi(I_a, \alpha), \quad F_K = \varphi(\mathcal{G}_K, \alpha)$$

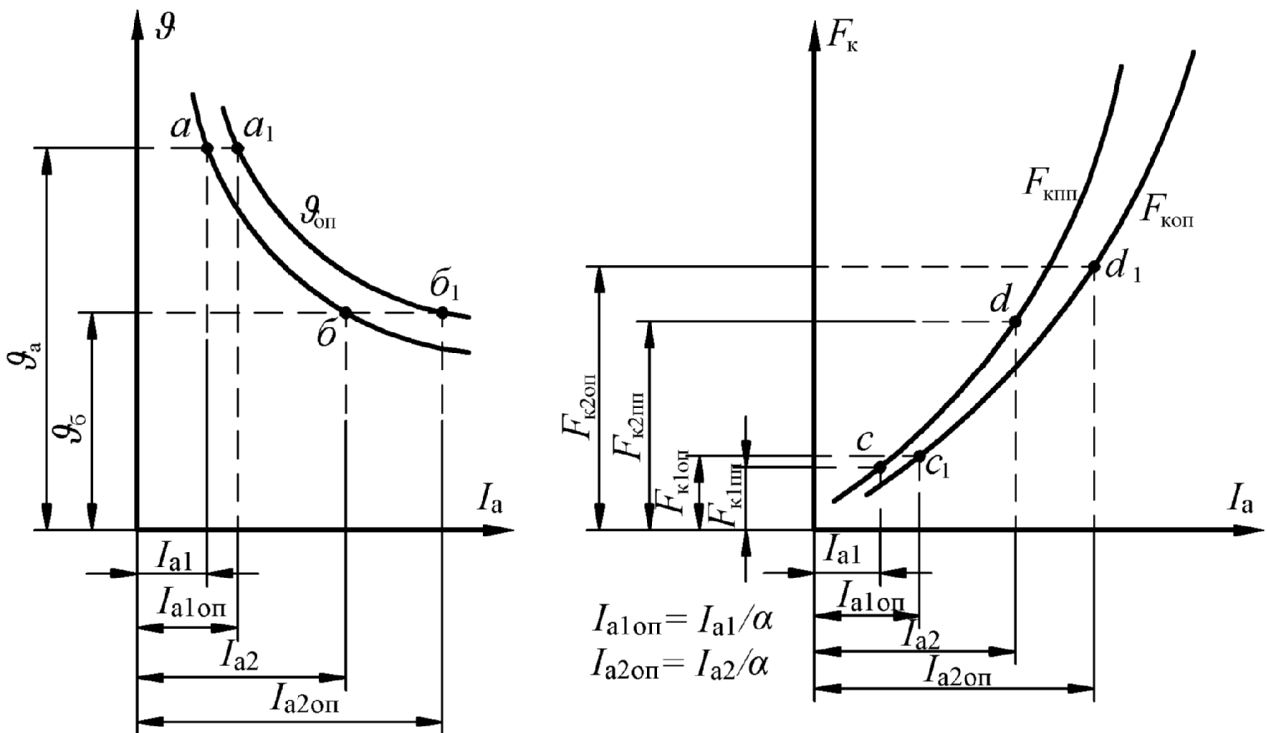


Рис. 7.9. Побудова характеристик ТЕД при ослабленні поля:  
а – електромеханічна; б – електротягова

При заданій кратності послаблення поля ( $\alpha$ ) розрахунок характеристик ТЕД при послабленні поля (ОП) виконується при відомих характеристиках для повного поля (ПП) за такими виразами:

– електромеханічна характеристика  $\mathcal{G}_K = \varphi(I_a, \alpha)$  (рис. 7.9,а)

$$\text{ОП} \rightarrow \mathcal{G}_K\left(\frac{I_a}{\alpha}\right) = \mathcal{G}_K(I_a) \leftarrow \text{ПП}; \quad (7.43)$$

– електротягова характеристика  $F_K = \varphi(I_a, \alpha)$  (рис. 7.9,б)

$$\text{ОП} \rightarrow F_{\text{к}}\left(\frac{I_{\text{а}}}{\alpha}\right) = \frac{1}{\alpha} \cdot F_{\text{к}}(I_{\text{а}}) \leftarrow \text{ПП}.$$
(7.44)

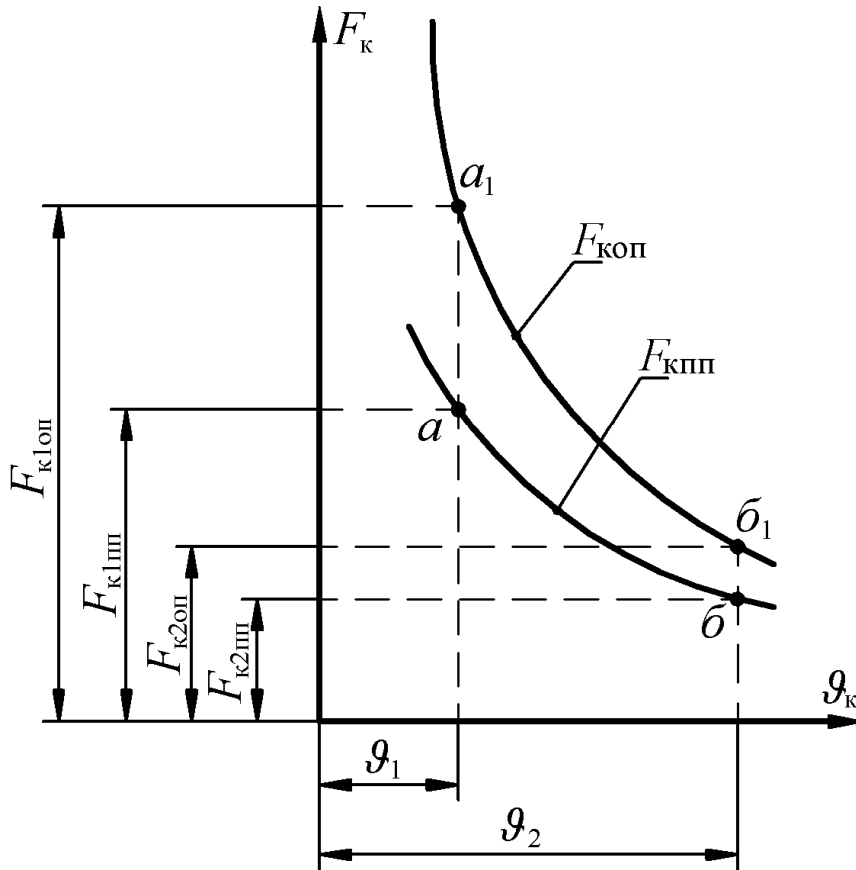


Рис. 7.10. Побудова тягової характеристики

При побудові тягової характеристики  $F_{\text{к}} = \varphi(s_{\text{к}}, \alpha)$  з ослабленим полем (рис. 7.10) необхідно враховувати, що при однаковій швидкості в режимі повного поля (ПП) і ослабленого поля (ОП) тягове зусилля на ободі колеса змінюється за законом

$$F_{\text{к} \text{оп}} = \frac{1}{\alpha} F_{\text{к} \text{пп}}.$$
(7.45)

### 7.3. Застосування ПЕОМ при аналізі тягових електродвигунів

Аналіз властивостей ТЕД виконується за матеріалом Додатку Д.5.

## 8. СПРОЩЕНИЙ ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК

Розрахунок виконується за методикою, наведеною у [5].

Гранично припустимі перевищення температури елементів МПС при температурі охолодного середовища  $t_{\text{охл}} = 40^{\circ}\text{C}$  наведені у табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Припустимі перегриви частин МПС

Елементи МПС	Припустима температура, $^{\circ}\text{C}$ , для ізоляції класів		
	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Обмотка якоря	80	110	125
Колектор	80	80	100
ОЗ з ізольованими поверхнями	80	100	125
Одношарові ОЗ з неізольованої шини	90	110	135
Багатошарові обмотки малого опору – ОЗ, ОДП, КО	80	100	125
Осердя якоря	80	100	125

### Обмотка якоря

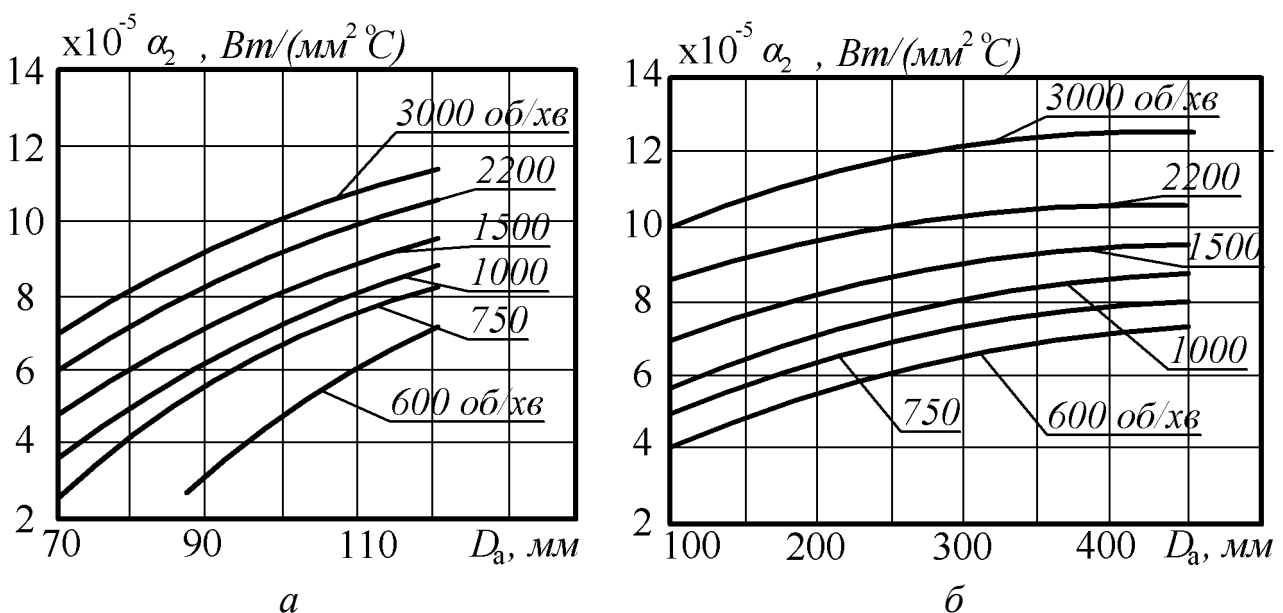


Рис. 8.1. Середні значення  $\alpha_2$ : а –  $2p = 2$ ; б –  $2p = 4$

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

$$\theta_{\text{ст}_a} = \frac{\Delta p_{\text{ea}} \cdot (2l_a / l_{\text{ва}}) + \Delta p_{\text{ст}}}{\alpha_2 \cdot l_a \cdot (\pi \cdot D_a + n_{\text{ка}} \cdot b_{\text{ка}})}, \quad (8.1)$$

де  $l_{\text{ва}}$  – середня довжина витка ОЯ, мм;

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні осердя якоря ( $\text{Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ) за рис. 8.1.

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки якоря, покладеної в напівзакриті пази якоря, °C,

$$\Delta \theta_{\text{із}_\Pi} = \frac{\Delta p_{\text{ea}} \cdot (2l_a / l_{\text{ва}})}{Z \cdot \Pi_2 \cdot l_a} \cdot \left( \frac{d_1 + d_2}{16 \lambda'_{\text{екв}}} + \frac{0,5 b_{\text{ік}}}{\lambda_{\text{екв}}} \right). \quad (8.2)$$

Тут  $\Pi_2$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження паза якоря, мм:

– при овальних напівзакритих пазах

$$\Pi_2 = 0,5\pi \cdot (d_1 + d_2) + 2h_\Pi; \quad (8.3)$$

– при прямокутних відкритих пазах

$$\Pi_2 = 2(b_\Pi + h_\Pi). \quad (8.4)$$

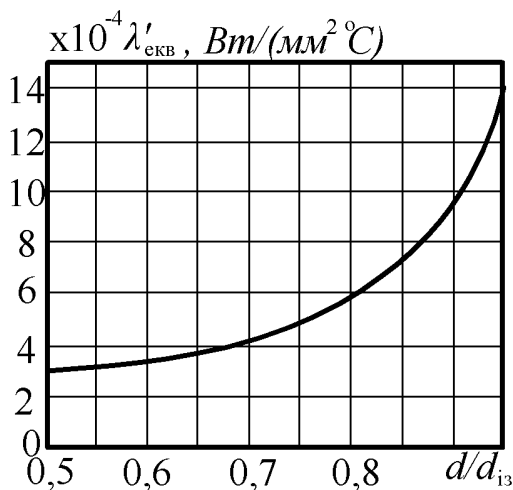


Рис. 8.2. Значення  $\lambda'_{\text{екв}}$

$\lambda'_{\text{екв}}$  – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції обмотки з круглого проводу (рис. 8.2),

$\text{Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$\lambda_{\text{екв}}$  – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності пазової ізоляції й ізоляції лобових частин з урахуванням повітряних проміжків

$$\lambda_{\text{екв}} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

$b_{\text{ік}}$  – двостороння товщина ізоляції по ширині паза якоря, мм.

Для обмоток якоря з твердих секцій, покладених у відкриті пази, °C,

$$\Delta \theta_{\text{із}_\Pi} = \frac{\Delta p_{\text{ea}} \cdot (2l_a / l_{\text{ва}})}{Z \cdot \Pi_2 \cdot l_a} \cdot \frac{0,5 b_{\text{ік}}}{\lambda_{\text{екв}}}. \quad (8.5)$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки якоря над температурою повітря усередині машини за відсутності аксіальних вентиляційних каналів у якорі, °С,

$$\theta_{\text{Л}} = \frac{\Delta p_{\text{эа}} \cdot (2l_{\text{Л}}/l_{\text{Ва}})}{2\pi \cdot D_{\text{а}} \cdot l_{\text{В}} \cdot \alpha_2}. \quad (8.6)$$

За наявності в осерді якоря аксіальних каналів значення  $\theta_{\text{Л}}$ , розраховане за формулою (8.6), слід зменшити у 2 рази.

Перепад температури в ізоляції лобових частин обмотки якоря з круглого проводу, покладеної в **напівзакриті** пази якоря, °С,

$$\Delta\theta_{\text{ІЗ}_{\text{Л}}} = \frac{\Delta p_{\text{еа}} \cdot (2l_{\text{Л}}/l_{\text{Ва}})}{2Z \cdot \Pi_{\text{Л}} \cdot l_{\text{Л}}} \cdot \left( \frac{h_{\text{П}}}{8\lambda'_{\text{екв}}} + \frac{0,5b_{\text{ІЛ}}}{\lambda_{\text{екв}}} \right), \quad (8.7)$$

де  $\Pi_{\text{Л}}$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження лобової частини однієї котушки якоря, мм:

– для **овальних** напівзакритих пазів

$$\Pi_2 = 1,3(d_1 + d_2) + h_{\text{П}}; \quad (8.8)$$

– для **прямокутних** відкритих пазів

$$\Pi_2 \approx 2(b_{\text{П}} + h_{\text{П}}); \quad (8.9)$$

$b_{\text{ІЛ}}$  – двостороння товщина ізоляції лобової частини обмотки якоря, мм.

Для обмоток якоря з твердих секцій, покладених у відкриті пази,

$$\Delta\theta_{\text{ІЗ}_{\text{Л}}} = \frac{\Delta p_{\text{еа}} \cdot (2l_{\text{Л}}/l_{\text{Ва}})}{2Z \cdot \Pi_{\text{Л}} \cdot l_{\text{Л}}} \cdot \frac{0,5b_{\text{ІЛ}}}{\lambda_{\text{екв}}}. \quad (8.10)$$

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

$$\theta'_{\text{оа}} = \frac{2l_{\text{а}}}{l_{\text{Ва}}} \cdot (\theta_{\text{ста}} + \Delta\theta_{\text{ІЗ}_{\text{П}}}) + \frac{2l_{\text{Л}}}{l_{\text{Ва}}} \cdot (\theta_{\text{Л}} + \Delta\theta_{\text{ІЗ}_{\text{Л}}}). \quad (8.11)$$

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

$$\theta_{\text{П}} = \frac{\Sigma\Delta p'}{S_{\text{охл}} \cdot \alpha_{\text{В}}}, \quad (8.12)$$

де  $\Sigma\Delta p'$  – сума всіх втрат за винятком частки втрат в обмотках головних і додаткових полюсів, а також пазової частини компенсаційної обмотки,



що передається через зовнішню поверхню станини безпосередньо в навколишнє середовище машини, Вт.

Для машин захищеного виконання IP22

$$\Sigma \Delta p' = \Sigma \Delta p - 0,1 (\Delta p_{e3} + \Delta p_{ек}). \quad (8.13)$$

Умовна поверхня охолодження машини, мм<sup>2</sup>,

$$S_{охл} \approx \pi \cdot D_H \cdot l_c. \quad (8.14)$$

Середнє значення коефіцієнта  $\alpha_B$ , що враховує підігрів повітря, визначають за рис. 8.3.

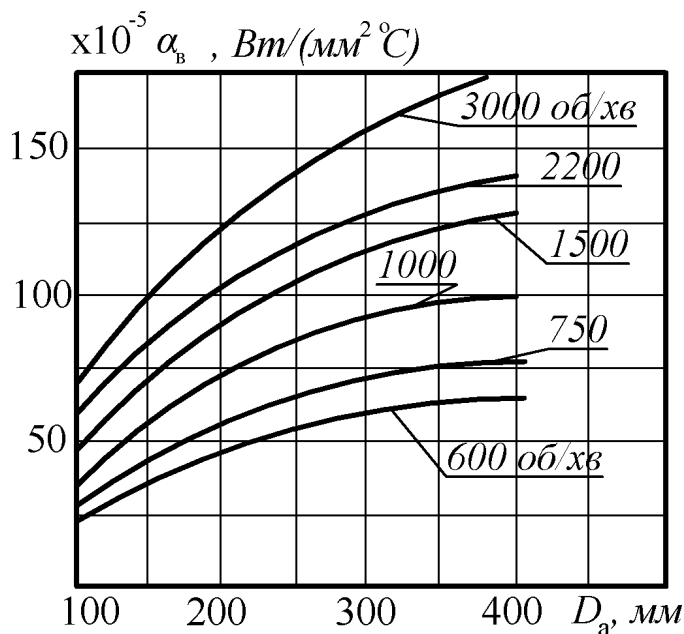


Рис. 8.3. Середні значення  $\alpha_B$

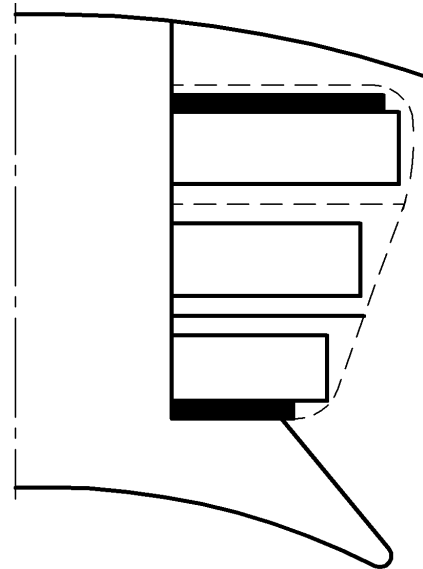


Рис. 8.4. Поверхня охолодження котушки ОЗ

Середнє перевищення температури обмотки якоря над температурою охолоджувального середовища, °С,

$$\theta_{oa} = \theta'_{oa} + \theta_{П}. \quad (8.15)$$

### Обмотка збудження

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

$$\theta_{кз} = 0,45 \cdot \frac{\Delta p_{e3}}{p \cdot S_{кз} \cdot \alpha_1}. \quad (8.16)$$

Умовна поверхня охолодження, мм<sup>2</sup>,

$$S_{\text{кз}} = l_{\text{вз}} \cdot \Pi_{\text{кз}}, \quad (8.17)$$

де  $\Pi_{\text{кз}}$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження котушки, мм.

При визначенні  $\Pi_{\text{кз}}$  слід скористатися ескізом міжполюсного вікна, виконаним у масштабі (рис. 8.4). При цьому поверхня котушки, що прилягає до осердя полюса, не враховується; поверхня, що прилягає до ізоляційних рамок, враховується з коефіцієнтом 0,3; поверхня в аксіальних каналах секціонованих котушок – з коефіцієнтом 0,5; зовнішня поверхня котушки враховується повністю. Середні значення периметра котушки збудження представлені на рис. 8.5.

Коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої поверхні охолодження котушки збудження  $\alpha_1$  визначається за рис. 8.6.

Перепад температури в ізоляції котушки, °C,

$$\Delta\theta_{\text{із}_3} = 0,45 \frac{\Delta p_{\text{ез}}}{p \cdot S_{\text{кз}}} \cdot \left( \frac{b_{\text{кз}}}{8\lambda'_{\text{екв}}} + \frac{b_{\text{ікз}}}{\lambda_{\text{екв}}} \right), \quad (8.18)$$

де  $b_{\text{кз}}$  і  $b_{\text{ікз}}$  – ширина котушки і однобічна товщина зовнішньої ізоляції котушки, мм.

Для котушок без зовнішньої ізоляції  $b_{\text{ікз}} = 0$ .

Для котушок з проводу прямокутного перерізу необхідно прийняти в формулі (8.18)  $\frac{b_{\text{кз}}}{8\lambda'_{\text{екв}}} = 0$ .

При круглих обмотувальних проводах і просоченні котушок лаком  $\lambda'_{\text{екв}}$  визначають за рис. 8.2, якщо ж котушки компаундовані, то значення  $\lambda'_{\text{екв}}$ , прийняте за рис. 8.2, збільшують у 2 рази.

Коефіцієнт  $\lambda_{\text{екв}} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} / (\text{мм}^2 \cdot ^\circ \text{C})$ .

Середнє перевищення температури обмотки збудження над температурою повітря усередині машини, °C,

$$\theta'_{\text{оз}} = \theta_{\text{кз}} + \Delta\theta_{\text{із}_3}. \quad (8.19)$$

Середнє перевищення температури обмотки збудження над температурою охолоджувального середовища, °C,

$$\theta_{\text{оз}} = \theta'_{\text{оз}} + \theta_{\text{п}}, \quad (8.20)$$

де  $\theta_{\text{п}}$  визначають за формулою (8.12).

Якщо густина струму в стабілізуючій обмотці не перевищує щільно-

сті струму в обмотці додаткових полюсів, то теплові розрахунки стабілізуючої обмотки можна не проводити.

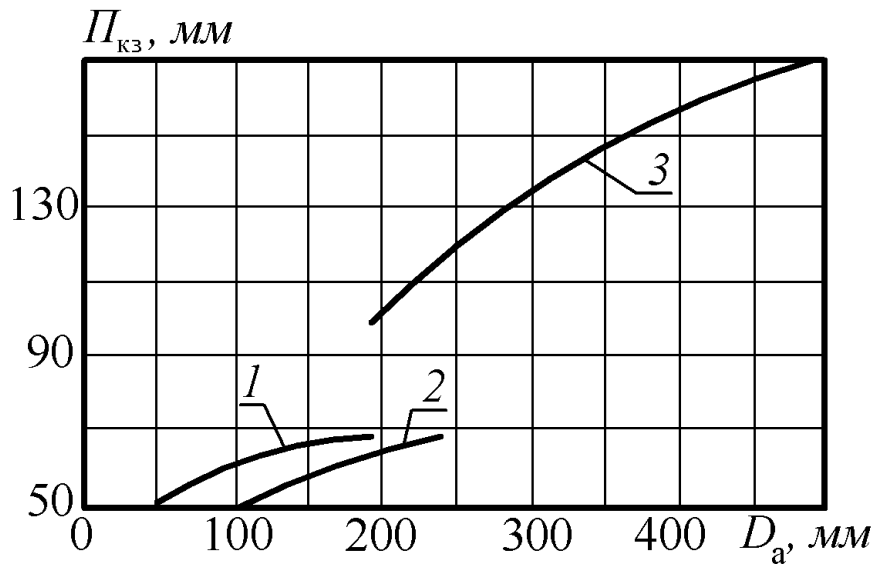


Рис. 8.5. Середні значення  $\Pi_{k3}$ :  
 1 – суцільні котушки при  $2p=2$ ;  
 2 – те саме при  $2p=4$ ;  
 3 – секціоновані котушки при  $2p=4$

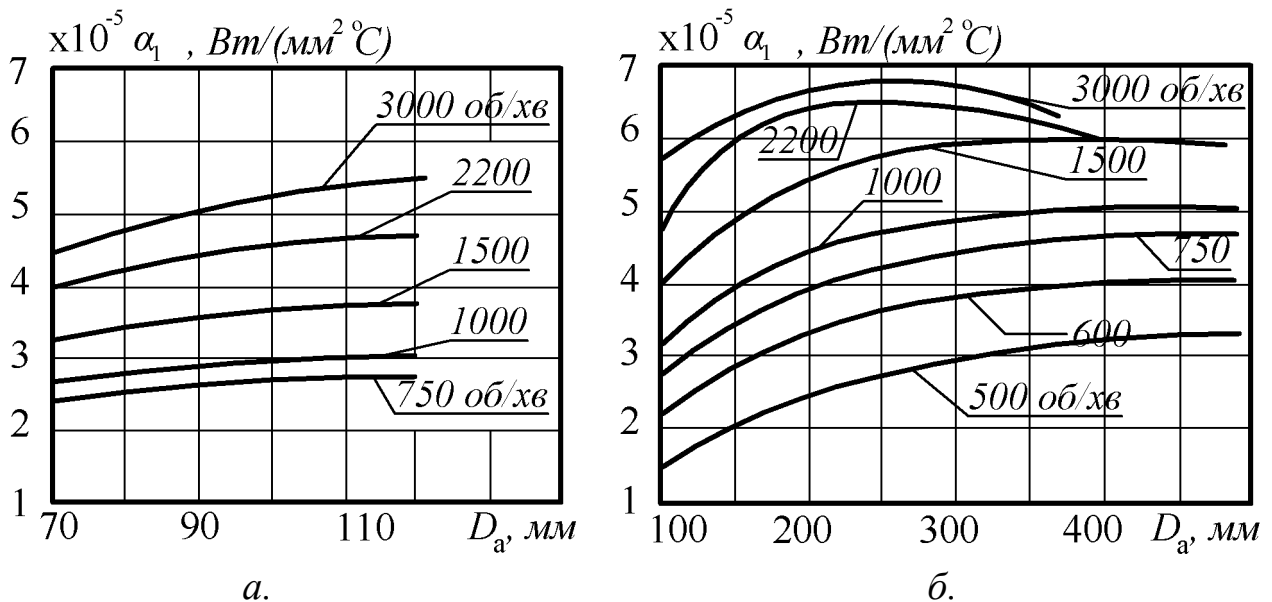


Рис. 8.6. Середні значення  $\alpha_1$ : а – при  $2p=2$ ; б – при  $2p=4$

### • Обмотка додаткових полюсів

Перевищення температури зовнішньої поверхні котушки додаткового полюса над температурою повітря усередині машини,  $^\circ\text{C}$ ,

$$\theta_{\text{кд}} = 0,45 \cdot \frac{\Delta p_{\text{ед}}}{\rho \cdot S_{\text{кд}} \cdot \alpha'_1}, \quad (8.21)$$

де  $\Delta p_{\text{ед}}$  – електричні втрати в обмотці додаткових полюсів, *Вт*;

$S_{\text{кд}}$  – умовна поверхня охолодження котушки додаткового полюса, *мм<sup>2</sup>*.

Для багатошарових котушок з ізолюваного проводу

$$S_{\text{кд}} = l_{\text{вд}} \cdot \Pi_{\text{кд}}, \quad (8.22)$$

де  $\Pi_{\text{кд}}$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження полюсної котушки, *мм*.

Вказівки до визначення  $\Pi_{\text{кз}}$  стосуються і визначення  $\Pi_{\text{кд}}$ . Середні значення  $\Pi_{\text{кд}}$  наведені на рис. 8.7.

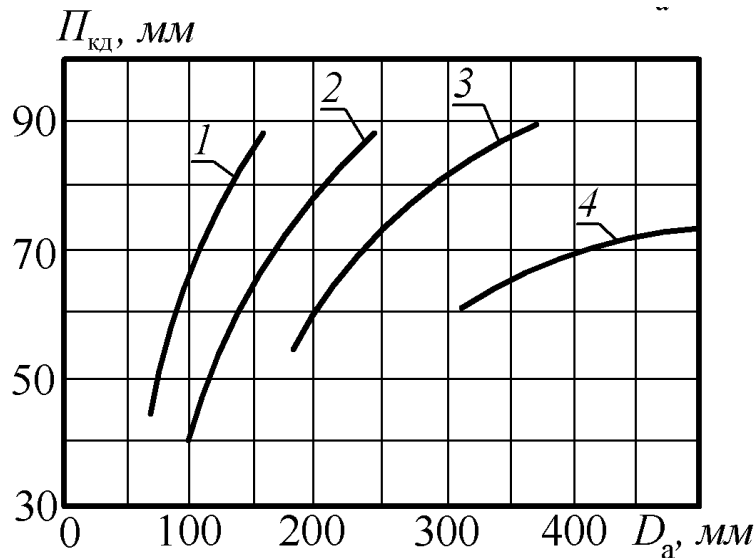


Рис. 8.7. Середні значення  $\Pi_{\text{кд}}$ :

1 – багатошарові котушки при  $2p = 2$ ; 2 – те саме при  $2p = 4$ ;

3 – одношарові з голої шинної міді для ДПС без КО й  $2p = 4$ ;

4 – те саме для компенсованих ДПС

Для одношарових котушок з голої шинної міді

$$S_{\text{кд}} = l_{\text{вд}} \cdot (w_{\text{кд}} \cdot a_{\text{ш}} + 0,6b_{\text{ш}}), \quad (8.23)$$

де  $a_{\text{ш}}$ ,  $b_{\text{ш}}$  – менший розмір (по висоті ДП) і більший розмір шини, *мм*.

Середні значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha'_1$  для машин зі ступенем захисту 1P22 наведені на рис. 8.8.

Перепад температури в ізоляції багатошарових котушок додаткових полюсів,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$$\Delta\theta_{13д} = 0,45 \frac{\Delta p_{ед}}{p_{д} \cdot S_{кд}} \cdot \left( \frac{b_{кд}}{8\lambda'_{екв}} + \frac{b_{i_{кд}}}{\lambda_{екв}} \right), \quad (8.24)$$

де  $b_{кд}$  – ширина котушки додаткового полюса, мм;

$b_{i_{кд}} = 0,2$  мм – однобічна товщина додаткової ізоляції котушки додаткового полюса; за відсутності такої ізоляції  $b_{i_{кд}} = 0$ ;

$\lambda'_{екв}$ ,  $\lambda_{екв}$  визначають так само, як і для обмотки збудження; для котушок з проводу прямокутного перерізу  $\frac{b_{кд}}{8\lambda'_{екв}} = 0$ .

Середнє перевищення температури обмотки додаткових полюсів над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\theta'_{д} = \theta_{кд} + \Delta\theta_{13д}. \quad (8.25)$$

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

$$\theta_{д} = \theta'_{д} + \theta_{п}, \quad (8.26)$$

де  $\theta_{п}$  визначають за формулою (8.12).

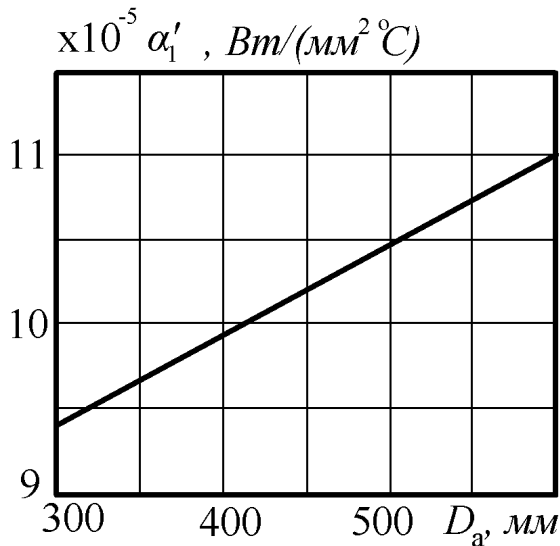


Рис. 8.8. Середні значення  $\alpha_1'$

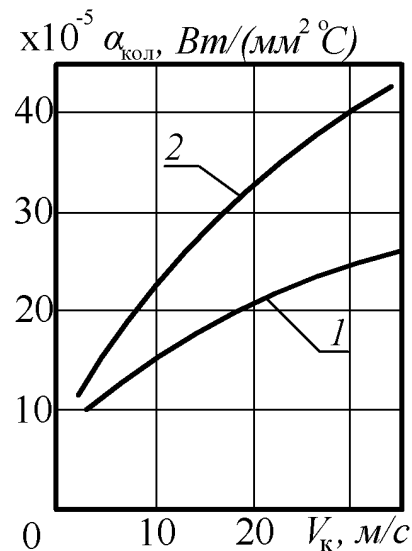


Рис. 8.9. Середні значення  $\alpha_{кол}$

### Компенсаційна обмотка (стрижнева)

Перевищення температури поверхні полюсного наконечника головного полюса над температурою повітря усередині машини, °С,

$$\theta_{\text{ПН}} = 0,9 \frac{(\Delta p_{\text{стр}} + \Delta p_{\text{пов}})}{S_{\text{ПН}} \cdot \alpha'_1}, \quad (8.27)$$

де  $\Delta p_{\text{стр}}$  – електричні втрати в стрижнях компенсаційної обмотки, *Вт*,

$$\Delta p_{\text{стр}} = \frac{I_a^2 \cdot 2p \cdot \rho_{\text{Cu}} \cdot N_{\text{кп}} \cdot l_{\text{стр}}}{a_{\text{к}}^2 \cdot q_{\text{стр}}} \cdot 10^{-3}; \quad (8.28)$$

$\Delta p_{\text{пов}}$  – поверхневі втрати в полюсних наконечниках, обумовлені пульсацією магнітної індукції, *Вт*.

Умовна поверхня охолодження полюсних наконечників головних полюсів, *мм<sup>2</sup>*,

$$S_{\text{ПН}} = 2p \cdot b_{\text{П}} \cdot l_{\text{П}}. \quad (8.29)$$

Перепад температури в ізоляції стрижнів, *°С*,

$$\Delta \theta_{1_{\text{ст}}} = 0,9 \frac{\Delta p_{\text{стр}}}{S_{\text{стр}}} \cdot \frac{b_{\text{ізк}}}{\lambda_{\text{екв}}}, \quad (8.30)$$

де  $b_{\text{ізк}}$  – однобічна товщина ізоляції в пазу головного полюса, *мм*:

$$b_{\text{ізк}} = 0,5 \left( b_{\text{Пк}} - b_{\text{Пр}} \cdot u_{\text{Пк}} \right); \quad (8.31)$$

$S_{\text{стр}}$  – умовна поверхня охолодження стрижнів у пазах, *мм<sup>2</sup>*,

$$S_{\text{стр}} = 2p \cdot Z_{\text{к}} \cdot l_{\text{П}} \cdot \Pi_{\text{к}}, \quad (8.32)$$

де  $\Pi_{\text{к}}$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження паза КО, *мм*,

$$\Pi_{\text{к}} = 2 \left( b_{\text{Пк}} + h_{\text{Пк}} \right). \quad (8.33)$$

Середнє перевищення температури поверхні дуг компенсаційної обмотки над температурою повітря усередині машини, *°С*,

$$\theta_{\text{дуг}} = \frac{\Delta p_{\text{дуг}}}{S_{\text{дуг}} \cdot \lambda_{\text{екв}}}, \quad (8.34)$$

де  $\Delta p_{\text{дуг}}$  – електричні втрати в дугах компенсаційної обмотки, *Вт*,

$$\Delta p_{\text{дуг}} = \frac{I_a^2 \cdot 2p \cdot \rho_{\text{Cu}} \cdot N_{\text{кп}} \cdot l_{\text{дуг}}}{a_{\text{к}}^2 \cdot q_{\text{дуг}}} \cdot 10^{-3}; \quad (8.35)$$

$S_{\text{дуг}}$  – умовна поверхня охолодження дуг компенсаційної обмотки,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{\text{дуг}} = 2p \cdot N_{\text{ст}} \cdot l_{\text{дуг}} \cdot (b_{\text{дуг}} + h_{\text{дуг}}). \quad (8.36)$$

Середнє перевищення температури компенсаційної обмотки над температурою повітря усередині машини,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$$\theta'_{\text{к}} = \frac{(\theta_{\text{пн}} + \Delta\theta_{\text{ист}}) \cdot l_{\text{ст}} + \theta_{\text{дуг}} \cdot l_{\text{дуг}}}{l_{\text{ст}} + l_{\text{дуг}}}. \quad (8.37)$$

Середнє перевищення температури компенсаційної обмотки над температурою охолоджувального середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$$\theta_{\text{к}} = \theta'_{\text{к}} + \theta_{\text{п}}. \quad (8.38)$$

### **Колектор**

Перевищення температури зовнішньої поверхні колектора над температурою повітря усередині машини,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$$\theta'_{\text{кол}} = \frac{\Delta p_{\text{ещ}} + \Delta p_{\text{трщ}}}{S_{\text{кол}} \cdot \alpha_{\text{кол}}}, \quad (8.39)$$

де  $S_{\text{кол}}$  – умовна поверхня охолодження колектора,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{\text{кол}} = \pi \cdot D_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}}; \quad (8.40)$$

$\alpha_{\text{кол}}$  – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні колектора (рис. 8.9).

Перевищення температури колектора над температурою охолоджувального середовища ( $^{\circ}\text{C}$ ) для машин захищеного виконання (1P22) із способом охолодження 1C01:

– при вході охолодного повітря з боку колектора

$$\theta_{\text{кол}} = \theta'_{\text{кол}}; \quad (8.41)$$

– при вході охолодного повітря з боку, протилежного колектору,

$$\theta_{\text{кол}} = \theta'_{\text{кол}} + \theta_{\text{п}}. \quad (8.42)$$

## 9. ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК

Вентиляційний розрахунок виконується за методикою, наведеною у [1,10].

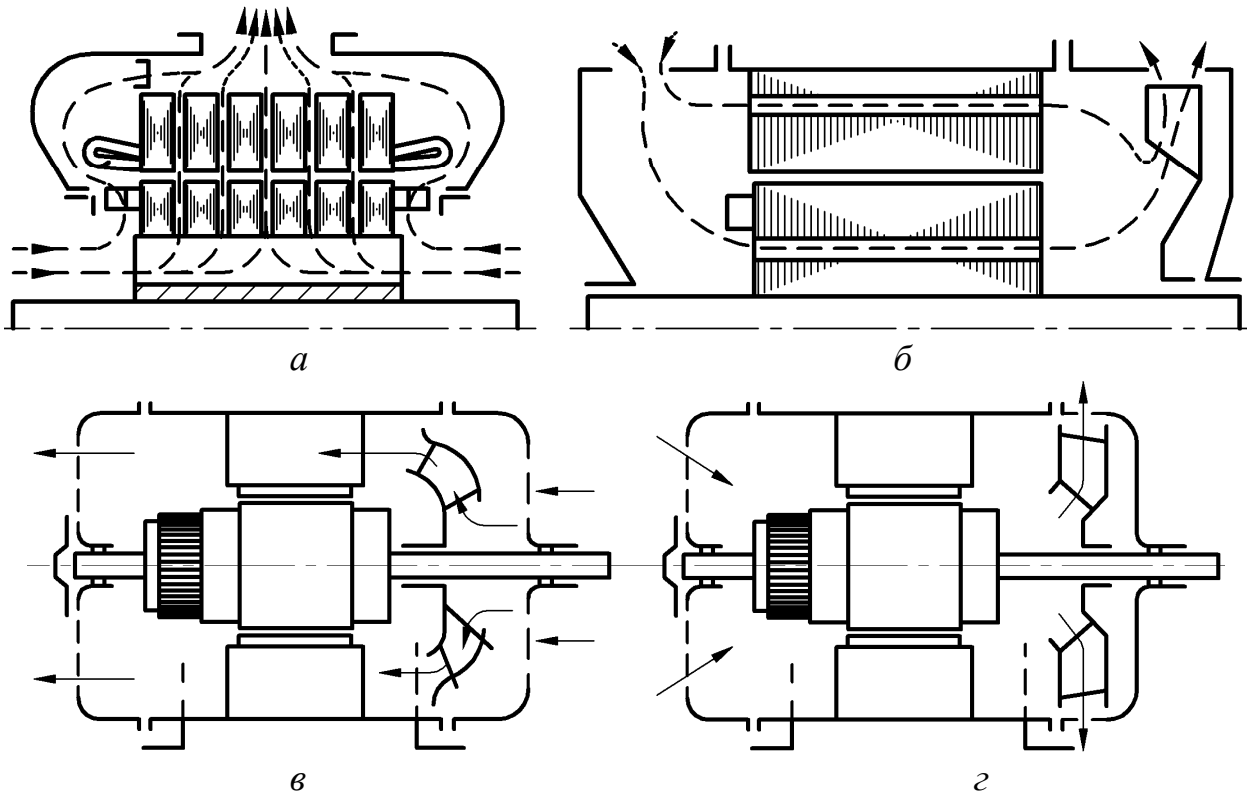


Рис. 9.1. Схеми вентиляції:  
а – радіальна; б – аксіальна;  
в – нагнітальна; г – витяжна

Витрата повітря, необхідна для охолодження МПС,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$$Q_{\text{пов}} = \frac{\Sigma \Delta p}{1100 \cdot \theta_{\text{п}}}, \quad (9.1)$$

де  $\theta_{\text{п}}$  – перевищення температури повітря усередині машини;

$\Sigma \Delta p$  – сума втрат в машині за формулою (5.248).

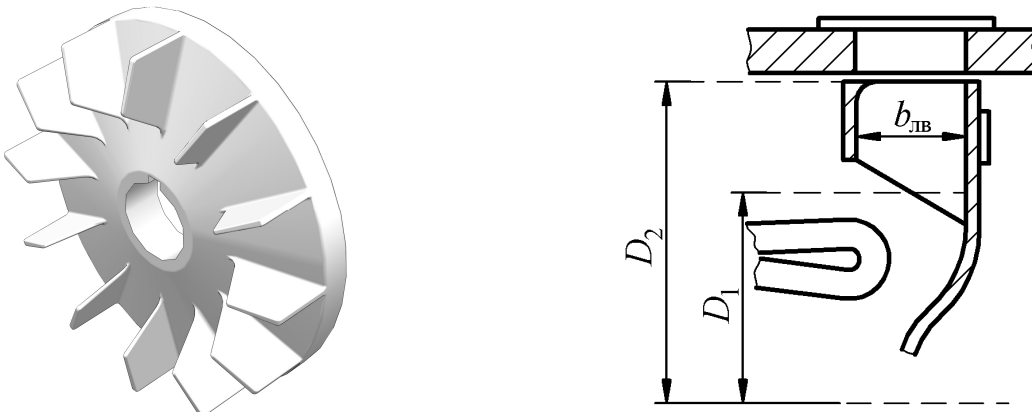


Рис. 9.2. Відцентровий вентилятор



При вентиляційному розрахунку МПС з аксіальною вентиляцією приймається, що перевищення температури повітря, що виходить з машини, над вхідним у два рази вище за середнє перевищення температури повітря усередині машини  $\theta_{\Pi}$  за формулою (8.12).

Тиск вентилятора для забезпечення необхідних витрат повітря, *Па*,

$$H = Z \cdot Q_{\text{пов}}^2, \quad (9.2)$$

де  $Z$  – еквівалентний аеродинамічний опір вентиляційного каналу машини, що можна прийняти за рис. 9.3.

При аксіальній системі вентиляції зовнішній діаметр (рис. 9.2) вбудованого відцентрового вентилятора, *мм*,

$$D_2 \approx 0,9 D_{\text{вс}}, \quad (9.3)$$

де  $D_{\text{вс}}$  – внутрішній діаметр станини, *мм*.

Внутрішній діаметр колеса відцентрового вентилятора, *мм*,

$$D_1 \approx (1,2 \dots 1,4) \cdot D_a, \quad (9.4)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря, *мм*.

Ширина лопаток вентилятора (рис. 9.2), *мм*,

$$b_{\text{лв}} \approx (0,12 \dots 0,15) \cdot D_2. \quad (9.5)$$

Число лопаток вентилятора

$$N_{\text{л}} = (6 \dots 10) \cdot D_2 / (D_2 - D_1) \quad (9.6)$$

рекомендується приймати рівним непарному числу для зменшення вентиляційного шуму.

Тиск у замкненому просторі у режимі неробочого ходу, *Па*,

$$H_0 = \eta_{\text{в0}} \cdot \left( \mathcal{G}_{\text{в2}}^2 - \mathcal{G}_{\text{в1}}^2 \right), \quad (9.7)$$

де  $\eta_{\text{в0}} \approx 0,6$  – ККД вентилятора в режимі неробочого ходу;

$\mathcal{G}_{\text{в2}}$ ,  $\mathcal{G}_{\text{в1}}$  – швидкості на зовнішній і внутрішній поверхнях вентилятора, *м/с*,

$$\mathcal{G}_{\text{в2}} = \pi \cdot D_{\text{в2}} \cdot n_{\text{н}} \cdot 10^{-3} / 60, \quad (9.8)$$

$$\mathcal{G}_{\text{в1}} = \pi \cdot D_{\text{в1}} \cdot n_{\text{н}} \cdot 10^{-3} / 60. \quad (9.9)$$

Витрата повітря в режимі короткого замикання, *м<sup>3</sup>/с*,

$$Q_{\text{вmax}} = 0,42 \cdot \mathcal{G}_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-6}, \quad (9.10)$$

де вхідний переріз вентилятора

$$S_2 \approx 0,92 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_{\text{лв}}, \text{ мм}^2. \quad (9.11)$$

Дійсна витрата повітря,  $m^3/c$ ,

$$Q_B = Q_{B_{\max}} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + Z \cdot Q_{B_{\max}}^2}}. \quad (9.12)$$

Дійсна витрата повітря ( $Q_B$ ) повинна дорівнювати витраті повітря, що необхідна для охолодження МПС ( $Q_{\text{ПОВ}}$ ) за формулою (9.1). У випадку невиконання цієї умови ( $Q_B < Q_{\text{ПОВ}}$ ) необхідно змінювати ширину лопаток вентилятора ( $b_{\text{ЛВ}}$ ) і діаметри відцентрового вентилятора ( $D_2, D_1$ ) до забезпечення необхідної витрати повітря.

Потужність, споживана вентилятором,  $Вт$ ,

$$P_B = \frac{H \cdot Q_{\text{П}}}{\eta_{\text{ЕВ}}}, \quad (9.13)$$

де  $\eta_{\text{ЕВ}} \approx (0,18 - 0,2)$  – енергетичний ККД вентилятора.

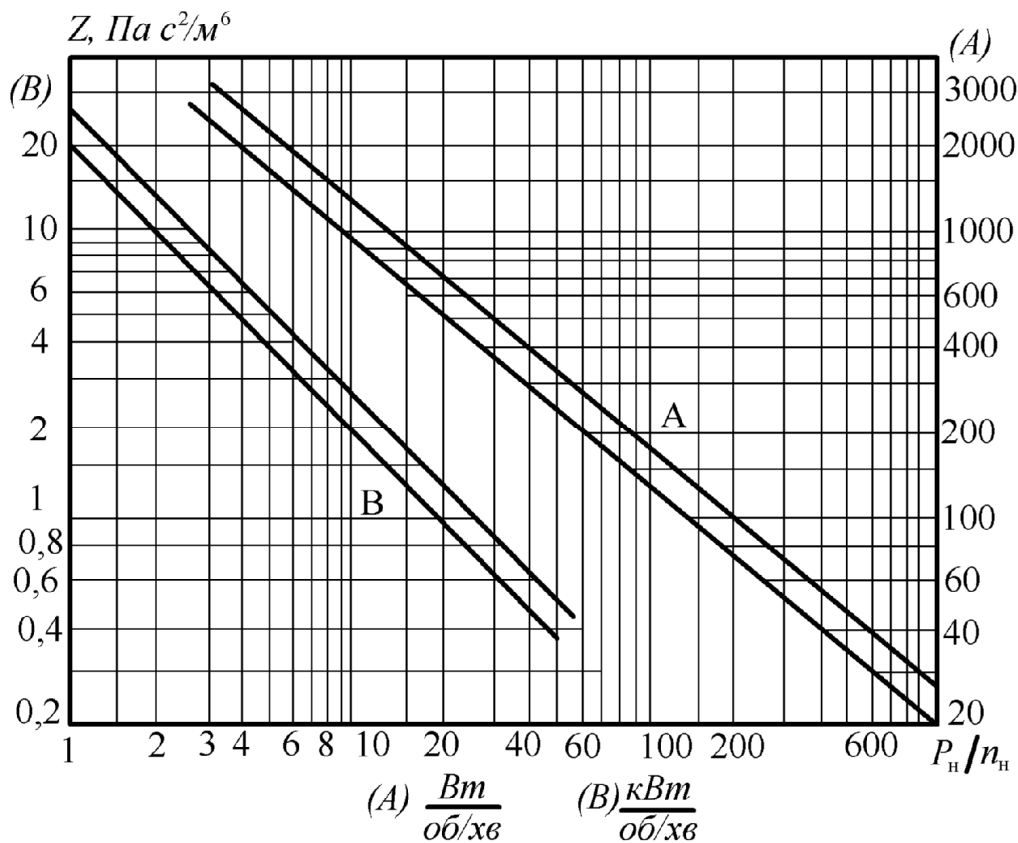


Рис 9.3. Середні значення аеродинамічного опору

Напір (тиск) вентилятора пропорційний квадрату частоти обертання двигуна  $H \equiv n^2$ , продуктивність вентилятора (витрата повітря)  $Q \equiv n$ , потужність, споживана вентилятором  $P_B \equiv n^3$ .

## 10. МЕХАНІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ

### 10.1. Розрахунок колектора

Колекторні пластини виготовляються з холоднотягнутої міді трапецеїдального перерізу ( $\sigma_B \leq 280 \text{ МН/м}^2$ ,  $\sigma_T \leq 240 \text{ МН/м}^2$ ) або кадмієвої міді ( $\sigma_B \leq 350 \text{ МН/м}^2$ ,  $\sigma_T \leq 350 \text{ МН/м}^2$ ) [5].

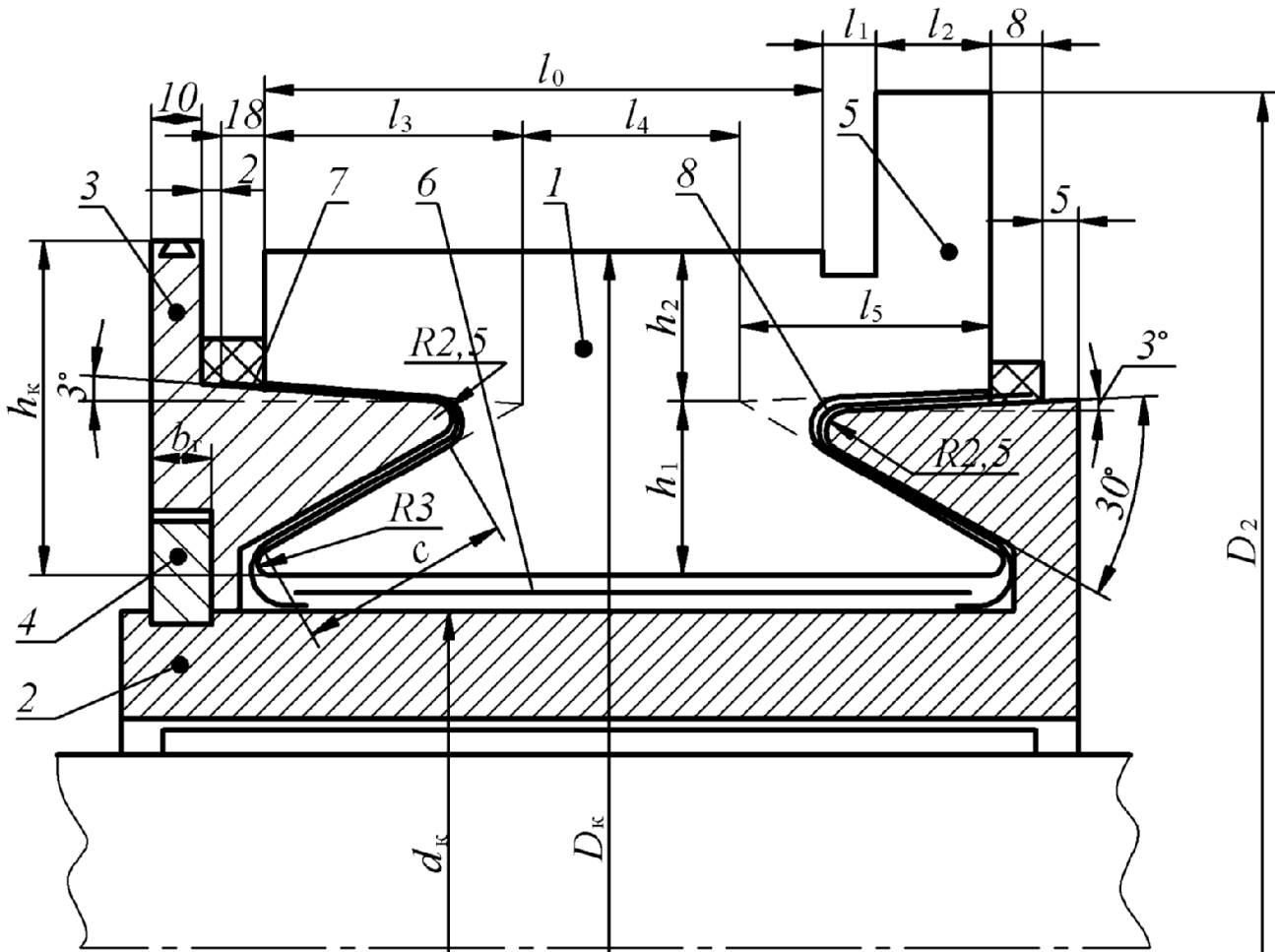


Рис. 10.1. Ескіз колекторної пластини:

- 1 – колекторна пластина; 2 – втулка  
 3 – натискний конусний фланець; 4 – гайка; 5 – петушок;  
 6 – ізоляційний циліндр; 7 – міканітові манжети

Довжина робочої поверхні колектора (рис. 10.1), мм,

$$l_0 = n_{\text{Щ}} \cdot l_{\text{Щ}} + 3 \cdot (n_{\text{Щ}} - 1), \quad (10.1)$$

де  $l_{\text{Щ}}$  – довжина щітки, мм;  $n_{\text{Щ}}$  – число щіток по довжині колектора.

Діаметр колектора, мм

$$D_K \approx (0,8 \dots 0,85) D_a \quad \text{або} \quad D_K \approx D_a - 1,5 h_{\Pi}, \quad (10.2)$$

де  $h_{\Pi}$  – висота паза якоря, мм.

Ширина технологічного виточення  $l_1 = (6 \dots 8)$  мм.

Ширина петушка колекторної пластини, мм,

$$l_2 = \frac{I_a}{2a \cdot 2 \cdot h_{\text{пр}} \cdot j_{\text{щ}}}, \quad (10.3)$$

де  $h_{\text{пр}}$  – висота ефективного провідника обмотки якоря, мм;

$j_{\text{щ}}$  – густина струму під щіткою, А/мм<sup>2</sup>.

З конструктивних міркувань  $l_2$  береться не меншим ніж 15 мм.

**Повна довжина колектора, мм,**

$$l_K = l_0 + l_1 + l_2. \quad (10.4)$$

**Висота колекторної пластини, мм,**

$$h_K = (8,5 \dots 11,5) \sqrt{0,1 D_K}, \quad (10.5)$$

де  $D_K$  – діаметр колектора, мм.

Висота ластівчиного хвоста, мм,

$$h_1 = (0,5 \dots 0,55) h_K. \quad (10.6)$$

Висота робочої частини пластини, мм,

$$h_2 = h_K - h_1. \quad (10.7)$$

Довжина середньої частини ластівчиного хвоста, мм,

$$l_4 = (1,2 \dots 1,6) h_1. \quad (10.8)$$

Довжина крайніх частин ластівчиного хвоста, мм,

$$l_3 = (1,5 \dots 2) h_1, \quad (10.9)$$

$$l_5 = (1,3 \dots 1,8) h_1. \quad (10.10)$$

Зусилля в небезпечному перерізі ластівчиного хвоста від дії відцентрових сил, МН/м<sup>2</sup>,

$$\sigma_1 = 135 \cdot 10^{-6} \cdot l_K \cdot \frac{h_K}{h_1} \cdot (D_K - h_K) \cdot \left( \frac{1,25 \cdot n_{\text{max}}}{1000} \right)^2. \quad (10.11)$$

Припустимо значення  $\sigma_1 \leq 120 \text{ МН/м}^2$ .

Зусилля в небезпечному перерізі колекторної пластини від дії відцентрових сил,  $\text{МН/м}^2$ ,

$$\sigma_2 = 150 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{l_4^2}{h_k - h_1 - \varepsilon} \cdot (D_k - h_k - h_1 - 2\varepsilon) \cdot \left( \frac{1,2 \cdot n_{\max}}{1000} \right)^2, \quad (10.12)$$

де  $\varepsilon = (10 \dots 15) \text{ мм}$  – зношування колектора за 10 років роботи.

Припустимо значення  $\sigma_2 \leq 170 \text{ МН/м}^2$ .

Питомий тиск на манжету від дії відцентрової сили,  $\text{МН/м}^2$ ,

$$p_1 \approx 0,02 \frac{h_1}{V_1} \cdot \sigma_1, \quad (10.13)$$

де  $V_1$  – проекція опорної поверхні ластівчиного хвоста на горизонтальну вісь,  $\text{мм}$ . Припустимо значення  $p_1 = (23 \dots 30) \text{ МН/м}^2$ .

Сила запресовування колектора,  $\text{МН}$ ,

$$P_{\text{запр}} = 1,8 \cdot D_k \cdot p_0 \cdot V_1 \cdot 10^{-6}, \quad (10.14)$$

де  $p_0 = (35 \dots 40) \text{ МН/м}^2$  – питомий тиск на манжеті від сил пресування.

Звичайно  $P_{\text{запр}}$  становить десятки тонн (до 1  $\text{МН}$ ).

Для колекторів з болтовим кріпленням за припустимим зусиллям в болтах  $\sigma_b = 250 \text{ МН/м}^2$  знаходять число болтів, які кріплять колектор,

$$m_b = \frac{P_{\text{запр}}}{\sigma_b \cdot 0,78 \cdot d_b^2} \cdot 10^6, \quad (10.15)$$

де  $d_b$  – діаметр болта, яким попередньо задаються,  $\text{мм}$ .

У гайкових колекторах (рис. 10.1) знаходять напругу в гайці або втулці колектора,  $\text{МН/м}^2$ ,

$$\sigma_\Gamma = \frac{P_{\text{запр}}}{\pi \cdot d_\Gamma \cdot b_\Gamma} \cdot 10^6, \quad (10.16)$$

де  $d_\Gamma$  – діаметр гайки,  $\text{мм}$ ;

$b_\Gamma$  – ширина гайки,  $\text{мм}$ .

Напруга в гайці  $\sigma_{\Gamma} \leq 80 \text{ МН/м}^2$  з урахуванням потрійного запасу за межею плинності матеріалу втулки колектора (сталь 25Л). Звичайно виконується (5...7) витків дрібного метричного різьблення.

## 10.2. Розрахунок кріплення обмотки

### 10.2.1. Розрахунок бандажів

На бандажі діють сила первинного натягу при бандажуванні якоря і відцентрова сила обмотки.

Розрахунки бандажного кріплення проводять [5] окремо для лобових частин і пазової частини обмотки якоря. При цьому враховують масу відповідної частини обмотки.

Маса лобової частини ОЯ, кг,

$$g_{\text{Л}} = 1,15 N_{\text{а}} \cdot q \cdot \tau \cdot 8,9 \cdot 10^{-6}. \quad (10.17)$$

Маса міді в пазовій частині ОЯ, кг,

$$g_{\text{П}} = 1,15 N_{\text{П}} \cdot z \cdot q \cdot l_{\text{а}} \cdot 8,9 \cdot 10^{-6}, \quad (10.18)$$

де  $N_{\text{а}}$  – повне число провідників ОЯ;  $N_{\text{П}}$  – число ефективних провідників у пазу;  $q$  – площа перерізу ефективного провідника ОЯ,  $\text{мм}^2$ ;  $l_{\text{а}}$  – довжина якоря,  $\text{мм}$ ;  $\tau$  – полюсне ділення якоря,  $\text{мм}$ ;  $z$  – числа пазів якоря.

*Дротові бандажі*

Відцентрова сила, яка діє на відповідну частину ОЯ,  $\text{Н}$ ,

$$C_i = 5,5 \cdot g_i \cdot (D_{\text{а}} - h_{\text{П}}) \cdot \left( \frac{1,2n_{\text{max}}}{1000} \right)^2, \quad (10.19)$$

де  $g_i$  – маса відповідної частини ОЯ, кг.

Напруга в бандажі

$$\sigma = \frac{C \cdot 10^6}{0,78 \cdot 2\pi \cdot d_{\text{б}}^2 \cdot m_{\text{б}}} + 0,08 \cdot g_{\text{а}}^3 \cdot 10^5, \quad (10.20)$$

де  $d_{\text{б}}$  – діаметр бандажної проволони,  $\text{мм}$ ;  $m_{\text{б}}$  – число витків бандажа на розглянутій частині;  $g_{\text{а}}$  – лінійна швидкість якоря при  $1,2n_{\text{max}}$ ,  $\text{м/с}$ .

Другий член у формулі (10.20) дає значення напруги в бандажі від власної відцентрової сили бандажу.

Напруга в бандажі від відцентрової сили  $\sigma \leq (450...500) \text{ МН/м}^2$ .

Розрахунки бандажа зводяться до визначення числа витків  $m_{\sigma}$ , які знаходять з формули (10.20), попередньо задаючи  $d_{\sigma}$  (табл. 10.1).

Бандажна проволока – сталева луджена, легована,  
 $\sigma_{\text{п}} = (1700...1800) \text{ МН/м}^2$ .

Таблиця 10.1

Діаметр бандажного дроту

$h_0, \text{ мм}$	200	225	250	280	315	> 315
$d_{\sigma}, \text{ мм}$	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5

*Бандажі із склострічки*

Склострічка виготовляється з безперервних паралельно орієнтованих склониток. Поліефірна смола після остаточного затвердіння скріплює шари стрічки, утворюючи монолітний бандаж.

Товщина стрічки  $b_{\text{стр}} = 0,2 \text{ мм}$ , ширина стрічки  $l_{\text{стр}} = (16,18,20) \text{ мм}$ .

Допустиме значення міцності  $\sigma_{\text{стр}} = 700 \text{ МН/м}^2$ .

Тангенціальна сила в бандажі на відповідній частині ОЯ,  $H$ ,

$$T_i = 0,9 \cdot g_i \cdot (D_a - h_{\text{п}}) \cdot \left( \frac{1,2 \cdot n_{\text{max}}}{1000} \right)^2, \quad (10.21)$$

де  $g_i$  – маса розглянутої частини обмотки якоря, кг,

$D_a$  – діаметр розточення якоря, мм,

$h_{\text{п}}$  – висота паза якоря, мм.

Знаючи розміри стрічки  $q_{\text{стр}} = b_{\text{стр}} \cdot l_{\text{стр}}$ , число витків стрічки на відповідній частині ОЯ

$$w_{\sigma_i} = \frac{T_i}{\sigma_{\text{стр}} \cdot q_{\text{стр}}} \cdot 10^6 = \frac{T_i}{\sigma_{\text{стр}} \cdot b_{\text{стр}} \cdot l_{\text{стр}}}. \quad (10.22)$$

Припустиме значення напруги від відцентрових сил у бандажі для

машин класу нагрівостійкості **B** –  $\sigma_{\text{стр}} \leq 150 \text{ МН/м}^2$ , для машин класу нагрівостійкості **F** і **H** –  $\sigma_{\text{стр}} \leq 125 \text{ МН/м}^2$ . Для бандажа використовується склострічка марки ЛСБ завтовшки (0,18...0,2) мм, завширшки 10, 15, 20, 25, 30 мм.

### 10.2.2. Розрахунок клина

Відцентрова сила, обумовлена масою ОЯ в пазу,  $H$ ,

$$C_0 = 8,3 \cdot g_{\text{п}} \cdot (D_a - h_{\text{п}}) \cdot \left( \frac{1,2 \cdot n_{\text{max}}}{1000} \right)^2, \quad (10.23)$$

де  $g_{\text{п}}$  – маса міді в пазу, кг,

Напруга в матеріалі клина,  $\text{МН/м}^2$ ,

$$\sigma_{\text{кл}} = \frac{1,5 \cdot C_0 \cdot (b_{\text{п}} + 0,5 \cdot h_{\text{кл}})}{l_a \cdot h_{\text{кл}}^2} \cdot 10^6, \quad (10.24)$$

де  $h_{\text{кл}}$  – висота клина, мм;

$b_{\text{п}}, h_{\text{п}}$  – ширина і висота паза якоря, мм.

Для клинів з текстоліту  $\sigma_{\text{кл}} = (25...30) \text{ МН/м}^2$ , для склотекстоліту

$$\sigma_{\text{кл}} = (22...25) \text{ МН/м}^2.$$

### 10.3. Розрахунок кріплення полюсів

Головні полюси кріплять до станини болтами, що вкручуються в отвори в тілі шихтованого полюса (рис. 10.2,а). У більших машинах, а також у машинах, підданих вібраціям, полюса кріплять до станини болтами, що вкручуються в сталеві стрижні, вставлені в отвори полюсів (рис. 10.2,б).

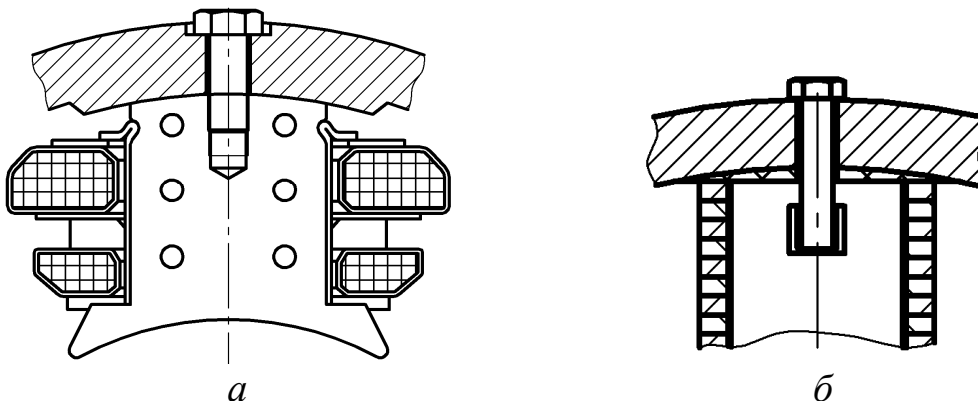




Рис. 10.2. Кріплення головних полюсів до станини

Розрахунки болтів для кріплення головних [5] полюсів ведуть за силою, спрямованою перпендикулярно до осі полюса, яка обумовлена дією електромагнітного моменту машини,  $H$ ,

$$F = \frac{k \cdot M_{\text{н}}}{p \cdot D_{\text{а}}} \cdot 10^3, \quad (10.25)$$

де  $k = (2 \dots 3)$  – коефіцієнт навантаження;  $M_{\text{н}}$  – номінальний момент машини,  $H \cdot \text{м}$ ;  $D_{\text{а}}$  – діаметр якоря,  $\text{мм}$ ;  $p$  – число пар полюсів.

Якщо прийняти коефіцієнт тертя між станиною і головним полюсом рівним 0,2, площа поперечного перерізу болтів, що кріплять один полюс,  $\text{мм}^2$ ,

$$S_{\text{б}} = \left( \frac{F + 9,81 \cdot m_{\text{ГП}}}{0,2 \cdot \sigma_{\text{СТ}}} \right) \cdot 10^6, \quad (10.26)$$

де  $m_{\text{ГП}}$  – маса головного полюса з полюсною котушкою,  $\text{кг}$ ;

$\sigma_{\text{СТ}}$  – допустиме напруження розтягання:

для сталі Ст3 –  $\sigma_{\text{СТ}} = 160 \text{ МПа}$ , для сталі Ст5 –  $\sigma_{\text{СТ}} = 200 \text{ МПа}$ .

Діаметр болта по внутрішньому діаметру різьблення,  $\text{мм}$ ,

$$d_{\text{б}} = 2 \sqrt{S_{\text{б}} / N_{\text{б}}}, \quad (10.27)$$

де  $N_{\text{б}}$  – кількість болтів на один полюс.

Отримане за формулою (10.27) значення  $d_{\text{б}}$  округляють до найближчого більшого стандартного значення.

Для запобігання зсуву полюса щодо станини число болтів, що припадає на один полюс, повинне бути не меншим від двох. Діаметр болта, що кріпить, повинен бути не меншим за (10...12)  $\text{мм}$ , інакше можливий обрив болта при його затягуванні.

Для регулювання зазорів між додатковими полюсами і станиною при налаштуванні комутації в машині застосовують прокладки, які розташовують між станиною і осердям додаткового полюса. При  $h_0 < 315 \text{ мм}$

застосовують прокладки з магнітної сталі, а при  $h_0 > 315$  мм магнітні прокладки чергують із немагнітними.

Додаткові полюси не беруть участь у створенні електромагнітного моменту машини, тому розрахунок болтів для кріплення додаткових полюсів проводять лише за силою магнітної взаємодії між додатковим полюсом і сусідніми головними полюсами. Болти, які кріплять додатковий полюс до станини, вкручують або в різьбовий отвір безпосередньо в осердді полюса, або в різьбовий отвір сталевий смуги, вставленої в отвір осердя.

## 11. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Сума витрат на виробництво і експлуатацію МПС [1, 5]

$$Z = [1 + t \cdot (k_a + k_o)] \cdot C_{\text{дв}} + C_a, \quad (11.1)$$

де  $t$  – нормативний строк окупності, років;  $k_a \approx (0,06 \dots 0,1)$  – коефіцієнт амортизаційних відрахувань;  $k_o \approx (0,1 \dots 0,12)$  – коефіцієнт витрат на обслуговування;  $C_{\text{дв}}$  – собівартість двигуна, грн;  $C_a$  – вартість витрат активної енергії, грн.

Собівартість двигуна

$$C_{\text{дв}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{вир}}, \quad (11.2)$$

де  $C_{\text{мат}}$ ,  $C_{\text{вир}}$  – вартість матеріалів і виробництва двигуна, грн.

Вартість матеріалів визначають виходячи із заготівельної маси та ціни матеріалів

$$C_{\text{мат}} = k_{\text{пр}} \cdot m_i \cdot C_i \cdot k_{\text{тр}}, \quad (11.3)$$

де  $C_i$  – ціна матеріалу розглянутого елемента конструкції, грн/кг;

$m_i$  – чиста маса елементів конструкції, кг;

$k_{\text{пр}}$  – коефіцієнт приведення чистої маси до заготівельної (табл. 11.1);

$k_{\text{тр}} \approx (1,05 \dots 1,1)$ , що враховує транспортно-заготівельні витрати.

Таблиця 11.1

Значення коефіцієнта приведення  $k_{\text{пр}}$

Елемент конструкції	$k_{\text{пр}}$
Провід обмоток	1,03
Колекторна мідь	1,1
Сталь масивної станини	1,1
Ізоляція	1,05
Конструкційні матеріали	1,1
Сталь осердя якоря	1,27
Сталь осердя головних полюсів	$b_p/1, 2b_r$
Сталь осердя додаткових полюсів	1,1

Маса обмотки якоря, кг,

$$m_{\text{ма}} = 4,5 \cdot z \cdot N_a \cdot l_{\text{ва}} \cdot 10^{-6}. \quad (11.4)$$

Маса обмоток збудження, кг,

$$m_{zi} = 8,9 \cdot 2p \cdot w_{zi} \cdot l_{Bi} \cdot 10^{-6}. \quad (11.5)$$

Маса колекторної міді, кг,

$$m_{МК} = 5,25 \cdot D_K^{1,5} \cdot l_K \cdot 10^{-5}, \quad (11.6)$$

де  $D_K, l_K$  – діаметр та довжина колектора, мм.

Маса ізоляції, кг,

$$m_{i3} = \left( 3,8 \cdot D_H^{1,5} + 0,2 D_H \cdot l_a \right) \cdot 10^{-4}. \quad (11.7)$$

Маса сталі полюсів, кг,

$$m_{стП} = 7,8 \cdot \left( 2p \cdot k_c \cdot b_{П} \cdot h_{П} \cdot l_{П} + 2p_d \cdot k_{cd} \cdot b_d \cdot h_d \cdot l_d \right) \cdot 10^{-5}. \quad (11.8)$$

Маса сталі зубців якоря, кг,

$$m_{za} = 7,8 \cdot Z \cdot k_c \cdot l_a \cdot b_{z\text{ ср}} \cdot h_z \cdot 10^{-6}. \quad (11.9)$$

Маса сталі спинки якоря, кг,

$$m_{cj} = 7,8 \cdot \left( \pi \cdot \frac{\left[ (D_a - 2h_{П})^2 - d_B^2 \right]}{4} - 0,785 \cdot n_K \cdot d_K^2 \right) \cdot l_a \cdot 10^{-6}. \quad (11.10)$$

Маса сталі якоря, кг,

$$m_{ca} = m_{cz} + m_{cj}. \quad (11.11)$$

Маса масивної станини, кг,

$$m_c = 6,05 \cdot l_c \cdot \left( D_{HC}^2 - D_{BC}^2 \right) \cdot 10^{-6}. \quad (11.12)$$

Маса конструкційних матеріалів, кг,

$$m_{KC} = \left( A \cdot D_{HC}^2 \cdot l_a + B \cdot D_{HC}^3 \right) \cdot 10^{-6}. \quad (11.13)$$

Таблиця 11.2

Значення коефіцієнтів  $A, B$

$h, \text{мм}$	Виконання	$A$	$B$
$\leq 200$	$IP22, IC01$	0,6... 08	0,8...1
225...315	$IP22, IC01$	0,7...09	0,8...1
355...500	$IP22, IC17$	0,8...1	1...1,3

Сумарна вартість матеріалів, грн,

$$C_{\text{мат}} = C_{\text{м}\Sigma} + C_{\text{МК}} + C_{\text{ст}} + C_{i3} + C_K, \quad (11.14)$$

де  $C_{M\Sigma}$  – сумарна вартість обмотувальних проводів (обмотка якоря, обмотка збудження, обмотка додаткових полюсів, компенсаційна обмотка);  $C_{MK}$  – вартість міді колектора;  $C_{CT}$  – сумарна вартість електротехнічної сталі;  $C_{I3}$  – вартість ізоляції;  $C_K$  – вартість конструкційних матеріалів.

Вартість виробництва спроектованого варіанта МПС можна оцінити приблизно, грн,

$$C_{\text{вир}} = k_{\text{пр1}} \cdot D_{\text{н}}^2 \cdot (k_{\text{пр2}} + l_a / D_a), \quad (11.15)$$

де  $D_{\text{н}}$ ,  $l_a$  – зовнішній діаметр двигуна й довжина якоря, мм;

$k_{\text{пр1}}$ ,  $k_{\text{пр2}}$  – коефіцієнти, що обумовлені рівнем технічного процесу, досконалістю устаткування, організацією виробництва;

$k_{\text{пр2}} = 0,4$ , значення  $k_{\text{пр1}}$  приймається з табл. 11.3 залежно від висоти осі обертання ( $h_0$ ).

Таблиця 11.3

До вибору коефіцієнта  $k_{\text{пр1}}$

$h_0, \text{мм}$	$\leq 200$	225 ... 312	355 ... 500
$k_{\text{пр1}}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-4}$

Вартість втрат електроенергії, грн,

$$C_a = c_{a1} \cdot T_{\Gamma} \cdot t \cdot k_3 \cdot (P_{2\text{н}} / \eta_3) \cdot (1 + a_1 - \eta_3), \quad (11.16)$$

де  $c_{a1}$  – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн;  $T_{\Gamma}$  – тривалість роботи за рік, год;  $t$  – нормативний строк окупності, років;  $k_3$  – середній коефіцієнт завантаження двигуна;  $P_{2\text{н}}$  – номінальна потужність, кВт;  $\eta_3$  – ККД при середньому коефіцієнті завантаження, в. о.;  $a_1$  – втрати в розподільчій мережі, віднесені до потужності двигуна.

Можна прийняти, що середній коефіцієнт завантаження ДПС становить: при  $h_0 \leq 250$  мм  $k_3 = 0,6$ ; при  $h_0 \geq 250$  мм  $k_3 = 0,75$ .

При розрахунках можна прийняти  $T_{\Gamma} = 1500$  год;  $t = 5$  років,  $a_1 = 0,04$ .

Необхідно провести техніко-економічне порівняння запроєктованої машини з аналогічною серійною машиною, для чого слід скористатися кривими питомих витрат активних матеріалів і використанням конструктивного об'єму МПС (рис. Е.1, Е.2 Додатку Е). При цьому витрата активної міді визначається без маси колектора, а маса активної сталі – підсумовуванням мас осердя якоря, основних та додаткових полюсів.

## 12. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### Завдання до проектування

Номінальна потужність двигуна	15,5 кВт
Номінальна напруга живлення	110 В
Частота обертання	1800 об/хв
Регулювання швидкості вниз від номіналу	0,2
Регулювання швидкості вверх від номіналу	2,3
Збудження	Шунтове
Система вентиляції	IC01
Система захисту	IP23
Клас нагрівостійкості матеріалів	F

### 1. Попередній розрахунок довжини якоря

Для розрахунку електродвигуна необхідно задатись такими розмірами: зовнішнім діаметром станини, зовнішнім діаметром якоря, кількістю пар полюсів двигуна, відношення струму збудження до струму мережі, коефіцієнтом корисної дії, лінійним навантаженням, відношенням полюсної дуги до полюсного ділення. Обрані величини зведено до табл. 12.1.

Таблиця 12.1

Попередні значення величин,  
необхідних для розрахунку довжини якоря

Висота осі обертання	$h_0 = 180 \text{ мм}$
Зовнішній діаметр станини	$D_{\text{НС}} = 346 \text{ мм}$
Зовнішній діаметр якоря	$D_a = 181 \text{ мм}$
Кількість полюсів	$2p = 4$
Доля струму збудження у струмі мережі	$k_B = 0,02$
Відношення ЕРС до напруги мережі	$k_e = 0,95$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 87 \%$
Лінійне навантаження	$A = 27000 \text{ А/м}$
Розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги	$\alpha_\delta = 0,65$
Індукція у повітряному зазорі	$B_\delta = 0,72 \text{ Тл}$

Розрахункова потужність електродвигуна

$$P' = \frac{k_d \cdot P_H}{\eta} = \frac{0,9 \cdot 15,5}{0,87} = 16 \text{ кВт},$$

де  $k_d = 0,9$ .

Розрахункова довжина якоря

$$l_\delta = \frac{6.1 \cdot P' \cdot 10^{12}}{D_a^2 \cdot n_H \cdot A_H \cdot B_\delta \cdot \alpha_\delta} = \frac{6.1 \cdot 16 \cdot 10^{12}}{181^2 \cdot 1800 \cdot 27000 \cdot 0.72 \cdot 0.65} = 0,131 \text{ м.}$$

Приймаємо довжину якоря рівною  $l_a = l_\delta = 130 \text{ мм}$ .

Радіальні та аксіальні вентиляційні канали у якорі не виконуються, так як його довжина не перевищує 30 см.

Осердя якоря збирається із холоднокатаної сталі марки 2312, коефіцієнт заповнення пакету сталлю  $k_{зап} = 0,95$ .

Відношення довжини якоря до діаметра якоря

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D_a} = \frac{0,130}{0,181} = 0,718.$$

## 2. Вибір типу обмотки якоря

Струм якоря

$$I_{ан} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\eta \cdot U_H} (1 - k_\theta) = \frac{15,5 \cdot 10^3}{0,87 \cdot 110} (1 - 0,02) = 158,7 \text{ А.}$$

При струмі якоря, меншому за 700 А, можна прийняти просту хвильову обмотку. Кількість паралельних гілок обмотки якоря  $2a = 2$ .

## 3. Розрахунок числа провідників обмотки якоря

Число ефективних провідників ОЯ, розраховане за значенням лінійного навантаження,

$$N_{a(A)} = \frac{A_a \cdot \pi \cdot D_a \cdot 2a}{I_{ан}} \cdot 10^{-3} = \frac{27000 \cdot \pi \cdot 181 \cdot 2}{158,7} = 193,5.$$

Число ефективних провідників ОЯ, розраховане за значенням магнітної індукції у повітряному зазорі,

$$N_{a(B)} = 38,2 \frac{k_e \cdot U_H \cdot a \cdot 10^6}{n_H \cdot \alpha_\delta \cdot D_a \cdot l_\delta \cdot B_\delta} = \frac{38,2 \cdot 0,95 \cdot 110 \cdot 1 \cdot 10^6}{1800 \cdot 0,65 \cdot 181 \cdot 130 \cdot 0,72} = 201.$$

Попередньо обираємо число ефективних провідників обмотки якоря

$$N'_a = 0,5(193,5 + 201) = 198$$

4. Вибір числа пазів якоря

Попереднє значення зубцевого поділу якоря  $t_1 = 27$  мм.

Число пазів якоря

$$Z_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{t_1} = \frac{\pi \cdot 181}{27} = 21.$$

Число ефективних провідників в пазу

$$N_{\Pi} = N'_a / Z_1 = 198 / 21 = 9,4 \approx 10.$$

Число витків в секції рівносекційної ОЯ

$$w_c = N_{\Pi} / (2u_{\Pi}) = 10 / 2 \cdot 5 = 1.$$

Остаточне число провідників обмотки якоря

$$N_a = N_{\Pi} \cdot Z_1 = 10 \cdot 21 = 210.$$

Попереднє і остаточне значення числа провідників обмотки якоря повинні відрізнятися не більш ніж на 10 %.

$$\frac{N_a - N'_a}{N_a} \cdot 100 = \frac{210 - 198}{210} \cdot 100 = 5,7 \%$$

Уточнене значення лінійного навантаження

$$A_a = \frac{N_a \cdot I_{ан}}{\pi \cdot D_a \cdot 2a} \cdot 10^3 = \frac{210 \cdot 158,7}{\pi \cdot 181 \cdot 2} \cdot 10^3 = 29309,4 \text{ А/м.}$$

Уточнене значення магнітної індукції в зазорі

$$B_{\delta} = \frac{38,2 \cdot k_e \cdot U_H \cdot a \cdot 10^6}{n_H \cdot \alpha_{\delta} \cdot D_a \cdot l_{\delta} \cdot N_a} = \frac{38,2 \cdot 0,95 \cdot 110 \cdot 10^6}{1800 \cdot 0,65 \cdot 181 \cdot 130 \cdot 210} = 0,69 \text{ Тл.}$$

Величина магнітного потоку в повітряному зазорі

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \alpha_{\delta} \frac{\pi \cdot D_a}{2p} \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6} = 0,69 \cdot 0,65 \cdot \frac{\pi \cdot 181}{4} \cdot 130 \cdot 10^{-6} = 0,0083 \text{ Вб.}$$

Полюсне ділення машини

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p} = \frac{3,14 \cdot 181}{4} = 142,2 \text{ мм.}$$



## 5. Розрахунок колектора

Кількість колекторних пластин

$$K = u_{\Pi} \cdot z_1 = 5 \cdot 21 = 105.$$

Діаметр колектора

$$D_K \approx (0.65 \div 0.7) D_a = (117,7 \div 126,7) \text{ мм}.$$

Стандартне значення діаметра колектора з цього проміжку –

$$D_K = 125 \text{ мм}.$$

Колекторне ділення

$$t_K = \frac{\pi D_K}{K} = \frac{3,14 \cdot 125}{105} = 3,74 \text{ мм}.$$

Це задовольняє умові, що при діаметрі колектора  $D_K < 300$  мм мінімальне значення колекторного ділення  $t_K \geq 3$  мм.

Середнє і максимальне значення напруги між колекторними пластинами

$$U_K = \frac{U_H \cdot 2p}{K} = \frac{110 \cdot 2 \cdot 2}{105} = 4,19 \text{ В};$$

$$U_{K \max} = U_K \cdot \frac{k_i}{\alpha_{\delta}} = 4,19 \cdot \frac{1,8}{0,65} = 11,6 \text{ В},$$

де  $k_i$  – коефіцієнт перекручування магнітного поля, що залежить від регулювання швидкості обертання ввєрх від номіналу. Прийнято  $k_i = 1,8$ . значення  $k_i$  буде скореговане за перехідною характеристикою.

При  $h_0 = 180$  мм значення  $U_{K \max}$  не повинне перевищувати 50 В.

Перевірка умови обмеження пульсації ЕРС на щітках

$$K/2p = 105/4 = 26,25 > (17...20).$$

## 6. Розрахунок геометрії зубцевої зони

Для подальших розрахунків необхідно задатись висотою паза ( $h'_{\Pi}$ ), максимальною індукцією зубця ( $B'_{z \max}$ ). Приймаємо попереднє значення  $h'_{\Pi} = 24$  мм,  $B'_{z \max} = 2,13$  Тл. Тоді ширина зубця у найвужчому місці

$$b'_{z \min} = \frac{t_1 \cdot B_d \cdot l_\delta}{k_{\text{зап}} \cdot B'_{z \max} \cdot l_a} = \frac{27 \cdot 0,69 \cdot 130}{0,95 \cdot 2,13 \cdot 130} = 9,24 \text{ мм}$$

де  $t_1$  – зубцевий поділ якоря.

Зубцевий шаг по дну паза

$$t_3 = \frac{\pi \cdot (D_a - 2 \cdot h_{\Pi})}{z_1} = \frac{\pi \cdot (181 - 2 \cdot 24)}{21} = 19,9 \text{ мм}$$

Попереднє значення ширини паза у штампі

$$b'_{\Pi} = t_3 - b'_{z \min} = 19,9 - 9,24 = 10,7 \text{ мм}$$

Попереднє значення ширини проводу

$$b'_{\text{пр}} = \frac{b'_{\Pi} - b_{\text{ік}} - b_{\text{скл}}}{u_{\Pi}} - b_{\text{ів}} = \frac{10,7 - 1,7 - 0,2}{5} - 0,15 = 1,602 \text{ мм}$$

де  $b_{\text{ік}} = 1,7 \text{ мм}$  – товщина ізоляції по ширині паза, при висоті осі обертання, меншій ніж  $315 \text{ мм}$ ,  $b_{\text{скл}} = 0,3 \text{ мм}$  – припуск по ширині паза,  $b_{\text{ів}} = 0,15 \text{ мм}$  виткова ізоляція.

При класі ізоляції  $F$  використовується прямокутний провід ПЕТП-155, приймаємо ширину проводу без ізоляції  $b_{\text{пр}} = 1,6 \text{ мм}$ .

Попередня висота проводу без ізоляції

$$h'_{\text{пр}} = \frac{h'_{\Pi} - h_{\text{ік}} - h_{\text{ок}} - h_{\text{скл}}}{2 \cdot w_c} - b_{\text{ів}} = \frac{24 - 4,8 - 2 - 0}{2 \cdot 1} - 0,15 = 8,45 \text{ мм}$$

де  $h_{\text{ік}} = 4,8 \text{ мм}$  – товщина ізоляції по висоті паза при  $h_0 < 315 \text{ мм}$ ;

$h_{\text{ок}} = 2 \text{ мм}$  – глибина бандажної канавки, при осі обертання  $h_0 < 315 \text{ мм}$ ;

$h_{\text{скл}} = 0$  – припуск по висоті паза.

При частоті перемагнічування  $f = \frac{p \cdot n_{\text{н}}}{60} = \frac{2 \cdot 1800}{60} = 60 \text{ Гц}$  приймаємо

два елементарних провідника ( $n_{\text{ел}} = 2$ ) без ізоляції заввишки

$h_{\text{пр}} = 4,25 \text{ мм}$ . Площа поперечного перерізу обраного провідника

$$q_{\text{пр}} = 6,585 \text{ мм}^2.$$

Уточнене значення висоти та ширини паза, відповідно:

$$\begin{aligned} h_{\Pi} &= 2 \cdot w_c \cdot (b_{\text{пр}} + b_{\text{ів}}) \cdot n_{\text{ел}} + h_{\text{скл}} + h_{\text{ок}} + h_{\text{ік}} = \\ &= 2 \cdot 1 \cdot (4,25 + 0,15) \cdot 2 + 0 + 2 + 4,8 = 24,4 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$b_{\Pi} = u_{\Pi} (b_{\text{пр}} + b_{\text{ІВ}}) + b_{\text{ІК}} + b_{\text{СКЛ}} = 5 \cdot (1,6 + 0,15) + 1,7 + 0,2 = 10,8 \text{ мм.}$$

Ширина зубця у найвужчій частині

$$b_{z2\text{min}} = \frac{\pi (D_a - 2h_{\Pi})}{z_1} - b_{\Pi} = \frac{\pi \cdot (181 - 2 \cdot 24,4)}{21} - 10,8 = 9,03 \text{ мм}$$

Геометрія зубцевої зони зображена на рис. 12.1.

Максимальна індукція в зубцевій зоні

$$B_{z2\text{max}} = \frac{t_1 \cdot B_{\delta} \cdot l_{\delta}}{k_{\text{зап}} \cdot b_{z2\text{min}} \cdot l_a} = \frac{27 \cdot 0,69 \cdot 130}{0,95 \cdot 9,03 \cdot 130} = 2,18 \text{ Тл}$$

Структура паза якоря з обраною ізоляцією зображена на рис. 12.2. Розміри ізоляції зведені до табл. 12.2.

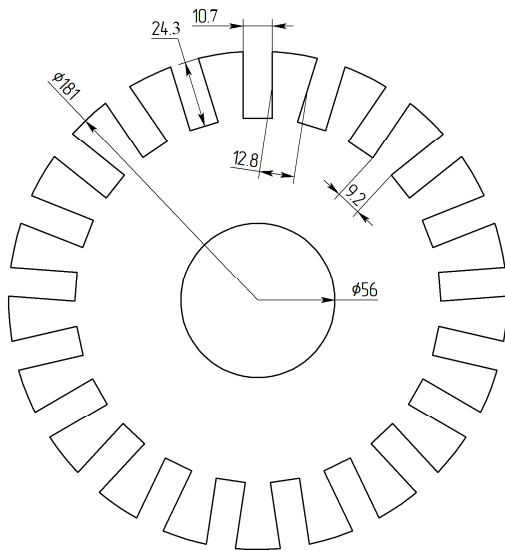


Рис. 12.1. Геометрія зубцевої зони якоря МПС

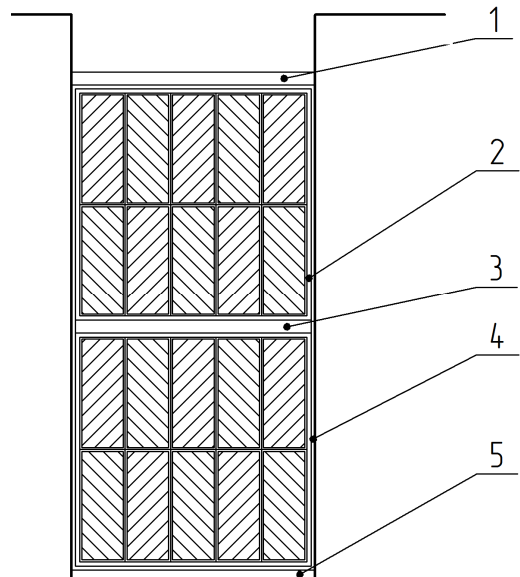


Рис. 12.2. Структура паза якоря з обраною ізоляцією

Таблиця 12.2

Розміри ізоляції паза

№	Матеріал		Число шарів	Товщина ізоляції, мм	
	Найменування	Товщина, мм		по ширині	по висоті
1	Склотекстоліт - СТЕФ	0,5	1	—	0,5
2	Синтофолій - F	0,16	3,5	1,1	2,2
3	Склотекстоліт - СТЕФ	0,5	1	—	0,5
4	Склолакотканина - ЛСП	0,15	1	0,3	0,6
5	Склотекстоліт - СТЕФ	0,5	1	—	0,5
Припуск на укладку				0,3	0,5

Густина струму ОЯ

$$j_a = \frac{I_{ан}}{2a \cdot S_{пр}} = \frac{158,7}{2 \cdot 13,17} = 6,03 \text{ А / мм}^2.$$

Шаг ОЯ по реальних пазах

$$y_z = \frac{z_1}{2p} - \xi = \frac{21}{2 \cdot 2} - 0,25 = 5,$$

де  $\xi$  – відносне скорочення обмотки.

Середнє зубцеве ділення якоря

$$t_1 = \pi \frac{D_a - h_{п}}{z_1} = \pi \frac{181 - 24,3}{21} = 23,5 \text{ мм.}$$

Середня ширина секції

$$b_c = t_1 \cdot y_z = 23,5 \cdot 5 = 117,5 \text{ мм.}$$

Середня довжина одної лобової частини секції ОЯ

$$l_{л} = 1,2 \cdot b_c + h_{п} + 40 = 1,2 \cdot 117,5 + 24,3 + 40 = 205 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка ОЯ

$$l_{в а} = 2 \cdot (l_a + l_{л}) = 2 \cdot (130 + 205) = 670 \text{ мм.}$$

Середня довжина вильоту лобової частини ОЯ

$$l_{вил} = 0,3 \cdot b_c + 0,5 \cdot h_{п} + 20 = 0,3 \cdot 117,4 + 0,5 \cdot 24,3 + 20 = 68 \text{ мм.}$$

Активний опір ОЯ при 115 °С

$$r_a = \frac{\rho \cdot N_a \cdot l_{ва}}{2 \cdot (2a)^2 \cdot q_{пр}} = \frac{24 \cdot 10^{-9} \cdot 210 \cdot 670}{2 \cdot (2)^2 \cdot 13,39} 10^3 = 0,0315 \text{ Ом.}$$

7. Розрахунок кроків обмотки якоря

Число елементарних пазів якоря  $Z_e = Z \cdot u_{п} = 21 \cdot 5 = 105$ .

Результуючий крок  $y = \frac{Z_e - 1}{p} = \frac{105 - 1}{2} = 52$ .

Перший частковий крок  $y_1 = \frac{Z_e}{2p} - \xi = \frac{105}{2 \cdot 2} - 1 \frac{1}{4} = 25$ .

Другий частковий крок  $y_2 = y - y_1 = 52 - 25 = 27$ .

Щітковий крок  $y_k = \frac{Z_e}{2p} = \frac{105}{2 \cdot 2} = 26,25$ .

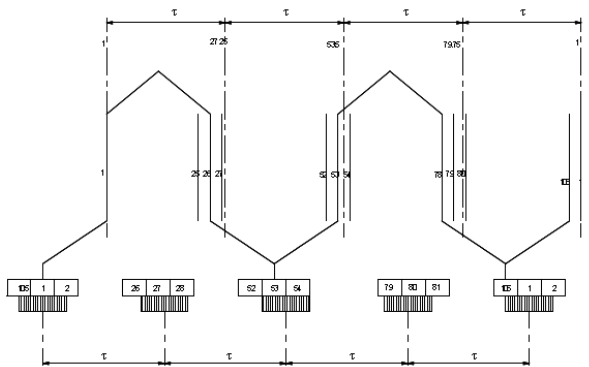


Рис. 12.3.  
Один хід  
простої хвильової  
симетричної  
лівоходової ОЯ

Один хід простої хвильової симетричної лівоходової обмотки якоря зображено на рис. 12.3.

## 8. Розрахунок повітряного зазору

Для забезпечення широкого діапазону регулювання повітряний зазор повинен забезпечити співвідношення

$$\frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A_H \cdot b_{HP}} \geq 1,25 \dots 1,3,$$

тому розрахункове значення повітряного зазору

$$\begin{aligned} \delta_p &= 0,35 \cdot \sqrt{n_{\max}^*} \cdot \frac{A_H \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau}{B_{\delta}} \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,35 \cdot \sqrt{2,3} \cdot \frac{29307,4 \cdot 0,65 \cdot 142,15}{0,69} \cdot 10^{-6} = 2,1 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Для забезпечення найменшої деформації кривої розподілу поля вибираємо частково розбіжний повітряний зазор (рис. 12.4). Під центром полюса приймаємо зазор  $\delta_0 = \delta_p / 1,5 = 1,4$  мм, на краях полюсної дуги зазор

$$\delta_{кр} = (2 \dots 3) \delta_p = (4,2 \dots 6,3) \text{ мм.}$$

Приймаємо  $\delta_{кр} = 5,5$  мм

Дійсна довжина полюсного наконечника

$$b_p = \alpha_{\delta} \cdot \tau = 0,65 \cdot 142,2 = 92,5 \text{ мм.}$$

Величина скоса полюсного наконечника

$$b = \frac{D_a}{2} \cdot \arccos\left(\frac{0,5 \cdot D_a + \delta_0}{0,5 \cdot D_a + \delta_{кр}}\right) = \frac{181}{2} \cdot \arccos\left(\frac{0,5 \cdot 181 + 1,4}{0,5 \cdot 181 + 5,5}\right) = 22 \text{ мм.}$$

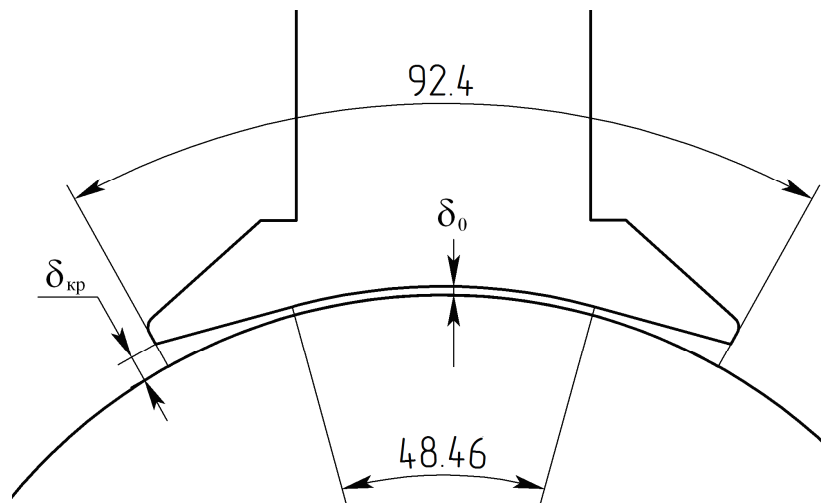


Рис.12.4. Ескіз повітряного зазору

Полюсна дуга, що припадає на рівномірну частину частково розбіжного зазору,

$$b'_p \approx b_p - 2b = 92,5 - 2 \cdot 22 = 48,5 \text{ мм.}$$

Співвідношення повітряних зазорів

$$c_\delta = \frac{\delta_{кр}}{\delta_0} - 1 = \frac{5,5}{1,4} - 1 = 2,93.$$

Коефіцієнт приведення частково розбіжного зазору

$$k_{еф} = \frac{1}{1 - \frac{0,083 \cdot 2^2}{0,65} (\sqrt{2,93} - \arctan \sqrt{2,93})} = 1,52.$$

Ефективний повітряний зазор складає

$$\delta_{еф} = k_{еф} \cdot \delta_0 = 1,52 \cdot 1,4 = 2,1 \text{ мм.}$$

## 9. Розрахунок розмірів магнітного кола

Для МПС захищеного виконання (IP22) із самовентиляцією (IC01) магнітна індукція в головному полюсі приймається рівною  $B_\Gamma = 1,65 \text{ Тл}$ .

Довжина полюса  $l_\Gamma = l_a = 130 \text{ мм}$

Ширина полюса

$$b_{\Gamma} = \frac{B_{\delta} \cdot \sigma_{\Gamma} \cdot \alpha_{\delta} \cdot l_{\delta}}{B_{\Gamma} \cdot k_{\text{сГ}} \cdot l_{\Gamma}} = \frac{0,69 \cdot 1,2 \cdot 0,65 \cdot 130}{1,65 \cdot 0,98 \cdot 130} = 47 \text{ мм},$$

де  $\sigma_{\Gamma} = 1,2$  – коефіцієнт розсіяння головного полюса;

$k_{\text{сГ}} = 0,98$  – коефіцієнт заповнення стрижня сталлю.

Висота головного полюса

$$h_{\Gamma} = \frac{D_{\text{Н}} - 2h_{\text{с}} - D_{\text{а}} - 2\delta_0}{2} = \frac{346 - 2 \cdot 17 - 181 - 2 \cdot 1,4}{2} = 64 \text{ мм},$$

де  $h_{\text{с}}$  – висота станини

$$h_{\text{с}} = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{2l_{\text{с}}} \cdot \frac{B_{\delta}}{B_{\text{с}}} = \frac{1,2 \cdot 0,65 \cdot 142,16 \cdot 130}{2 \cdot 223} \cdot \frac{0,69}{1,25} = 18 \text{ мм},$$

а  $B_{\text{с}} = 1,3 \text{ Тл}$  – попереднє значення індукції в станині;

$l_{\text{с}}$  – довжина станини

$$l_{\text{с}} = l_{\text{а}} - k_{\text{сГ}} \cdot \tau = 130 - 0,65 \cdot 142,16 = 223 \text{ мм},$$

де  $k_{\text{сГ}} = 0,65$ .

Ширина виступу полюсного наконечника

$$b_{\text{ГН}} = 0,12 \cdot b_{\Gamma} = 0,12 \cdot 47,3 = 5,7 \text{ мм}.$$

Висота виступу полюсного наконечника

$$h_{\text{ГН}} = 0,6 \cdot (b_{\text{р}} - b_{\Gamma}) \cdot \frac{B_{\delta}}{B_{\Gamma}} = 0,6 \cdot (92,4 - 47,3) \cdot \frac{0,69}{1,65} = 11 \text{ мм}.$$

Орієнтовно діаметр вала

$$d'_{\text{в}} = c_{\text{в}} \cdot \sqrt{P_{\text{Н}}/n_{\text{Н}}} = 275 \cdot \sqrt{15,5/1800} = 56,37 \text{ мм}$$

Прийнято  $d_{\text{в}} = 55 \text{ мм}$ .

Висота спинки якоря

$$h_{\text{ж}} = 0,5 \cdot (D_{\text{а}} - d_{\text{в}}) - h_{\text{п}} = 0,5 \cdot (181 - 55) - 24,1 = 39 \text{ мм}.$$

## 10. Розрахунок магнітного кола

Збільшення магнітного опору повітряного зазору враховується коефіцієнтом повітряного зазору  $k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_{\delta 3} \cdot k_{\delta 4}$ .

$k_{\delta 1} = 1$  при відсутності компенсаційної обмотки (КО).

$k_{\delta 2}$  враховує зубчасту будову якоря

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\Pi}}{t_1 - b_{\Pi} + 5 \frac{\delta \cdot t_1}{b_{\text{Ш}}}} = 1 + \frac{10,65}{27 - 10,65 + 5 \cdot \frac{1,81 \cdot 27}{10,65}} = 1,25.$$

$k_{\delta 3}$  враховує вплив бандажних канавок якоря

$$k_{\delta 3} = 1 + \frac{n_{\text{БК}} \cdot b_{\text{БК}} \cdot h_{\text{БК}}}{l_{\delta} \cdot (\delta_{\text{еф}} + h_{\text{БК}}) - n_{\text{БК}} \cdot b_{\text{БК}} \cdot h_{\text{БК}}} = 1 + \frac{2 \cdot 20 \cdot 2}{130 \cdot (2,1 + 2) - 2 \cdot 20 \cdot 2} = 1,17,$$

де  $n_{\text{БК}} = 2$  – кількість бандажних канавок;

$b_{\text{БК}} = 20$  мм – ширина бандажної канавки;

$h_{\text{БК}} = 2$  мм – висота бандажної канавки.

$k_{\delta 4} = 1$  при відсутності радіальних каналів на якорі.

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_{\delta 3} \cdot k_{\delta 4} = 1 \cdot 1,25 \cdot 1,17 \cdot 1 = 1,46.$$

МРС повітряного зазору

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot \delta_{\text{еф}} \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 1,46 \cdot 0,69 \cdot 2,1 \cdot 10^3 = 1692 \text{ А}.$$

Перерізи зубців у найбільш вузькій, широкій та середній зонах:

$$b_{z1} = t_1 - b_{\Pi} = 27 - 10,65 = 16,4 \text{ мм};$$

$$b_{z2} = \frac{\pi \cdot (D_a - h_{\Pi})}{z_1} - b_{\Pi} = \frac{\pi \cdot (180 - 24,1)}{21} - 10,65 = 12,8 \text{ мм};$$

$$b_{z3} = t_3 - b_{\Pi} = 19,9 - 10,65 = 9,25 \text{ мм}.$$

Індукція у мінімальному перерізі

$$B_{z3} = B_{\delta} \cdot \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z3} \cdot l_{\text{см}} \cdot \kappa_c} = 0,69 \cdot \frac{27 \cdot 130}{9,25 \cdot 130 \cdot 0,95} = 2,128 \text{ Тл}.$$

Індукція у максимальному перерізі

$$B_{z1} = B_{\delta} \cdot \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{\text{см}} \cdot \kappa_c} = 0,69 \cdot \frac{27 \cdot 130}{16,4 \cdot 130 \cdot 0,95} = 1,198 \text{ Тл}.$$

Індукція у середній частині зубця



$$B_{z2} = B_{\delta} \cdot \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{\text{CT}} \cdot k_c} = 0,69 \cdot \frac{27 \cdot 130}{12,8 \cdot 130 \cdot 0,95} = 1,53 \text{ Тл.}$$

Індукція перевищує 1,8Тл лише у мінімальному перерізі, де частина магнітного потоку проходить крізь паз, тому необхідно врахувати насичення в цій зоні за допомогою коефіцієнта зубця

$$k_{z \text{ max}} = \frac{b_{\Pi} \cdot l_a}{b_{z3} \cdot k_c \cdot l_{\text{CT}}} = \frac{10,65 \cdot 130}{9,25 \cdot 0,95 \cdot 130} = 1,21.$$

За значенням індукції у мінімальному перерізі та коефіцієнтом зубця по кривій намагнічування для сталі 2013 МПС при індукції  $> 1.8 \text{ Т}$  (Додаток А) приймаємо значення напруженості  $H_{z \text{ max}} = 42260 \text{ А/м}$ , напруженості інших перерізів приймаємо за таблицею намагнічування для сталі 2013 для зубців (Додаток А) :

$H_{z \text{ min}} = 140 \text{ А/м}$  – напруженість у максимальному перерізі;

$H_{z \text{ ср}} = 943 \text{ А/м}$  – напруженість на середній висоті зубця.

Середнє значення напруженості магнітного поля у зубцях

$$H_z = \frac{1}{6} \cdot (H_{z \text{ min}} + H_{z \text{ max}} + 4H_{z \text{ ср}}) = \frac{1}{6} (140 + 42260 + 4 \cdot 943) = 7696 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Середня довжина шляху магнітного потоку дорівнює висоті паза, тоді МРС зубцевої зони

$$F_z = H_z \cdot h_{\Pi} \cdot 10^{-3} = 7696 \cdot 24,1 \cdot 10^{-3} = 186 \text{ А.}$$

Магнітна індукція у спинці якоря

$$B_j = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot h_j \cdot l_{\text{CT}} \cdot k_c} = \frac{0,0083 \cdot 10^6}{2 \cdot 39 \cdot 130 \cdot 0,95} = 0,876 \text{ Тл.}$$

По кривій намагнічування сталі 2013 напруженість магнітного поля у спинці якоря (Додаток А)

$$H_j = 96 \text{ А/м.}$$

Середня довжина шляху магнітного потоку

$$L_j = \frac{\pi (d_B + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2} = \frac{\pi \cdot (56 + 39)}{4 \cdot 2} + \frac{39}{2} = 57 \text{ мм.}$$

МРС спинки якоря

$$F_j = H_j \cdot L_j = 96 \cdot 57 \cdot 10^3 = 5,5 \text{ А.}$$

Головні полюси виконуються з анізотропної сталі 3411.

Середня довжина шляху магнітного потоку у полюсі

$$L_\Gamma = h_\Gamma = 64 \text{ мм.}$$

Величина магнітної індукції у головному полюсі

$$B_\Gamma = \frac{\sigma_\Gamma \cdot \Phi \cdot 10^6}{b_\Gamma \cdot l_\Gamma \cdot k_{сГ}} = \frac{1,2 \cdot 0,0083 \cdot 10^6}{47,3 \cdot 130 \cdot 0,98} = 1,65 \text{ Тл,}$$

де  $k_{сГ} = 0,98$  – коефіцієнт заповнення пакету полюса сталлю.

Напруженість магнітного поля за кривою намагнічування для сталі 3411

(Додаток А)  $H_\Gamma = 1500 \text{ А/м}$ , тоді МРС полюса

$$F_\Gamma = L_\Gamma \cdot H_\Gamma \cdot 10^{-3} = 64 \cdot 1500 \cdot 10^{-3} = 96 \text{ А.}$$

Еквівалентний зазор у стику полюса зі станиною

$$\delta_{Гс} = 2 \cdot l_\Gamma \cdot 10^{-4} + 0,1 = 2 \cdot 130 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 0,126 \text{ мм.}$$

МРС зазору стику

$$F_{\delta_{Гс}} = 0,95 \cdot \delta_{Гс} \cdot B_\Gamma \cdot 10^3 = 0,95 \cdot 0,126 \cdot 1,65 \cdot 10^3 = 198 \text{ А.}$$

Приймаємо монолітну станину із сталі Ст3.

Індукція в станині

$$B_c = \frac{\sigma_\Gamma \cdot \Phi}{2 \cdot h_c \cdot l_c} \cdot 10^6 = \frac{1,2 \cdot 0,0083}{2 \cdot 18 \cdot 222,4} \cdot 10^6 = 1,24 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля у станині (Додаток А)  $H_c = 1590 \text{ А/м}$ ,

довжина шляху магнітного потоку у станині

$$l_c = \frac{\pi(D_{1Н} - h_c)}{4p} + \frac{h_c}{2} = \frac{\pi \cdot (346 - 17,2)}{4 \cdot 2} + \frac{17,2}{2} = 137,7 \text{ мм,}$$

тоді МРС станини

$$F_c = H_c \cdot l_c \cdot 10^{-3} = 1590 \cdot 137,7 \cdot 10^{-3} = 219 \text{ А.}$$

МРС магнітного кола

$$F_\Sigma = F_\delta + F_z + F_j + F_\Gamma + F_{\delta_{Гс}} + F_c = 2400 \text{ А.}$$

МРС перехідного шару

$$F_{\delta_{zj}} = F_\delta + F_z + F_j = 1692 + 186 + 5,5 = 1884 \text{ А.}$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = \frac{2400}{1692} = 1,42.$$

За результатами розрахунку МРС на ПЕОМ побудовані характеристики неробочого ходу (рис. 12.5)

$$B_{\delta} = \varphi(F_{\delta zj}), B_{\delta} = \varphi(F_{\Sigma}), B_{\delta}^* = \varphi(F_{\Sigma}^*), \Phi = \varphi(F_{\Sigma}).$$

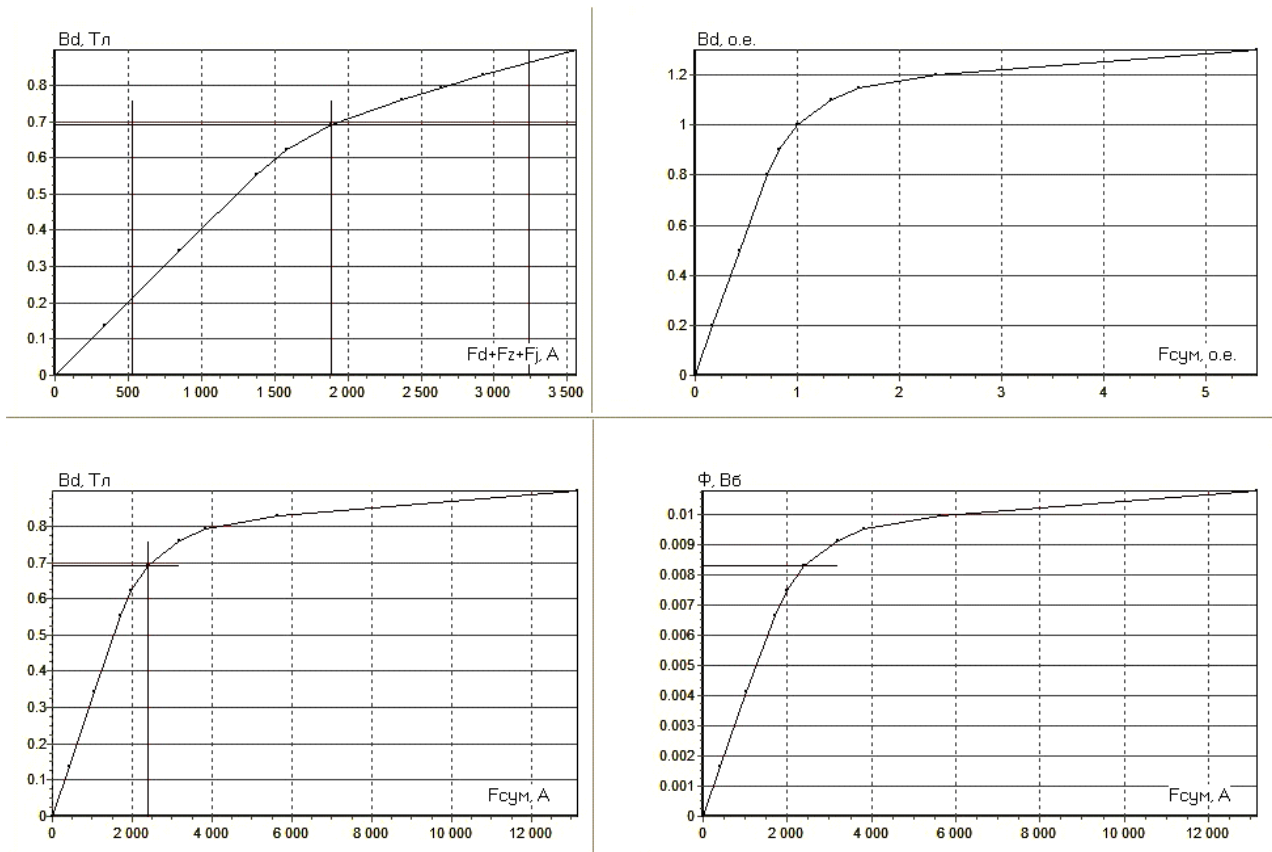


Рис. 12.5. Характеристики неробочого ходу

## 11. Аналіз магнітного поля на перекидання

МРС перехідного шару  $F_{\delta zj} = 1883$  А. МРС якоря на краю полюсної дуги –  $F_{ap} = 0,5 A_H \cdot b_{HP} \cdot 10^{-3} = 1354$  А. Тобто умова неперекидання магнітного поля у номінальному режимі виконується –  $F_{\delta zj} / F_{ap} > 1,2$ .

## 12. Урахування дії поперечної реакції якоря, що розмагнічує

Середнє значення індукції у повітряному зазорі при навантаженні

$$B_{\delta \text{сер}} = \frac{1}{6} (AB + DE + 4GH) = \frac{1}{6} (0,25 + 0,9 + 4 \cdot 0,69) = 0,652 \text{ Тл}.$$

Зменшення індукції у повітряному зазорі

$$\Delta B_{\delta} = B_{\delta} - B_{\delta\text{сер}} = 0,69 - 0,652 = 0,038 \text{ Тл}.$$

МРС, еквівалентна розмагнічувальній дії якоря, визначається за характеристикою перехідного шару, зображеній на рис. 12.6. за даними, розрахованими на ПЕОМ. За формулою Сімпсона МРС реакції якоря

$$F'_{qdH} = \frac{1}{6} \cdot \frac{BC - DE}{BC + DE} \cdot 2F_{ap} = \frac{1}{6} \cdot \frac{0,532 - 0,179}{0,532 + 0,179} \cdot 2 \cdot 1354 = 224 \text{ А}.$$

Уточнене значення МРС, еквівалентної розмагнічувальній дії якоря

$$F_{qdH} = \frac{1}{6} \cdot \frac{BC - DE}{B'C' + D'E'} \cdot 2F_{ap} = \frac{1}{6} \cdot \frac{0,532 - 0,179}{0,43 + 0,203} \cdot 2 \cdot 1354 = 251 \text{ А}.$$

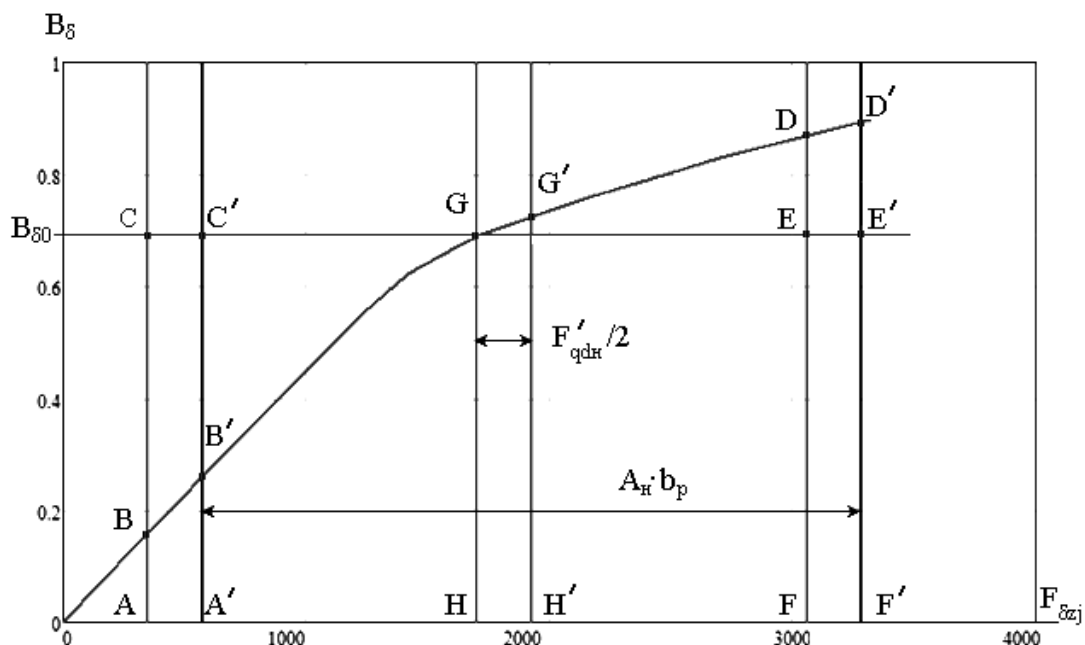


Рис. 12.6. Характеристика перехідного шару

### 13. Розрахунок МРС обмоток збудження

*Стабілізуюча обмотка*

Попереднє значення МРС стабілізуючої обмотки

$$F'_{ст} \approx F_{qdH} = 251 \text{ А}.$$

З метою уніфікації провідники стабілізуючої та обмотки ДП виконуємо з однакового проводу, тому густина струму в них буде однаковою

$J_{ст} = J_{д} = 5 \text{ А/мм}^2$ , тоді кількість витків у стабілізуючій обмотці

$$w_{\text{СТ}} = \frac{F'_{\text{СТ}}}{I_{\text{АН}}} = \frac{251}{158,7} = 1,57.$$

Приймаємо  $w_{\text{СТ}} = 2$ .

Остаточне значення МРС стабілізуючої обмотки

$$F_{\text{СТ}} = w_{\text{СТ}} \cdot I_{\text{АН}} = 2 \cdot 158,7 = 317 \text{ А.}$$

Площа перерізу проводу стабілізуючої обмотки

$$q_{\text{СТ}} = I_{\text{АН}} / j_{\text{СТ}} = 158,7 / 5 = 31,7 \text{ мм}^2.$$

За сортаментом обираємо шину з перерізом  $q_{\text{СТ}} = 31,9 \text{ мм}^2$ , зі сторонами  $a_{\text{ПР}} \times b_{\text{ПР}} = 1,81 \times 18 \text{ мм}$ .

Середня довжина витка стабілізуючої обмотки

$$\begin{aligned} l_{\text{ВС}} &= 2(l_{\Gamma} + b_{\Gamma}) + \pi(b_{\text{КС}} + 2r) = \\ &= 2 \cdot (130 + 47,3) + \pi(15 + 2 \cdot 8,95) = 457 \text{ мм}, \end{aligned}$$

де  $b_{\text{КС}} = 15 \text{ мм}$  – ширина котушки стабілізуючої обмотки;

$$r \geq 0,05 \frac{b_{\text{ПР}}^2}{a_{\text{ПР}}} = 0,05 \frac{18^2}{1,81} = 8,95 \text{ мм} \text{ – радіус округлення проводу.}$$

Опір стабілізуючої обмотки при  $115 \text{ }^\circ\text{C}$

$$r_{\text{СТ}} \cdot \rho \frac{2p \cdot w_{\text{СТ}} \cdot l_{\text{ВС}}}{a_{\text{С}}^2 \cdot q_{\text{СТ}}} 10^3 = 24 \cdot 10^{-9} \frac{4 \cdot 2 \cdot 457}{1 \cdot 31,9} 10^3 = 0,00274 \text{ Ом.}$$

#### *Паралельна обмотка збудження*

Попереднє значення МРС паралельної обмотки збудження

$$F'_{\text{Ш}} = F_{\Sigma} + F_{\text{qd}} - F_{\text{СТ}} = 2219 + 251 - 317 = 2153 \text{ А.}$$

Приймаємо значення ширини котушки  $b'_{\text{КШ}} = 27 \text{ мм}$ .

Середня довжина витка паралельної обмотки збудження

$$\begin{aligned} l_{\text{ВШ}} &= 2(l_{\text{а}} + b_{\text{П}}) + \pi(b'_{\text{КШ}} + 2 \cdot b_i + 2 \cdot b_3 + 2 \cdot b_{\text{К}}) = \\ &= 2(130 + 47,3) + \pi(27 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) = 460 \text{ мм} \end{aligned}$$

Поперечний переріз провідника

$$q'_{\text{Ш}} = 1,05 \cdot \rho \cdot \frac{2p \cdot F'_{\text{Ш}} \cdot l_{\text{ВШ}}}{U_{\text{Н}}} = 1,15 \cdot 24 \cdot \frac{4 \cdot 2153 \cdot 460}{110} \cdot 10^{-6} = 0,907 \text{ мм}^2.$$

Вибираємо провід марки ПЕТ-155 з такими розмірами:

$q_{\text{Ш}} = 0,985 \text{ мм}^2$  – площа перерізу голого провідника;  
 $d_{\text{Ш із}} = 1,2 \text{ мм}$  – діаметр ізолюваного проводу;  
 $d_{\text{Ш}} = 1,12 \text{ мм}$  – діаметр голого проводу.

Приймаємо густину струму у паралельній обмотці  $J_{\text{Ш}} = 5 \text{ А/мм}^2$ , тоді кількість витків у шунтовій обмотці збудження

$$w_{\text{Ш}} = \frac{F'_{\text{Ш}}}{J_{\text{Ш}} \cdot q_{\text{Ш}}} = \frac{2153}{5 \cdot 0,985} = 437.$$

Остаточне значення МРС паралельної обмотки збудження

$$F_{\text{Ш}} = w_{\text{Ш}} \cdot J_{\text{Ш}} \cdot q_{\text{Ш}} = 437 \cdot 5 \cdot 0,985 = 2152 \text{ А}.$$

Опір обмотки при  $115 \text{ }^\circ\text{C}$

$$r_{\text{Ш}} = \rho \frac{2\rho \cdot w_{\text{Ш}} \cdot l_{\text{вШ}}}{q_{\text{Ш}}} 10^3 = 24 \cdot 10^{-9} \frac{4 \cdot 437 \cdot 460}{0,985} 10^3 = 19,6 \text{ Ом}$$

Параметри ізоляційних матеріалів зведені до табл. 12.3.

Таблиця 12.3

Марки та параметри ізоляційних матеріалів обмоток

№	Призначення	Матеріал		Число шарів
		Найменування	Товщина, мм	
1	Ізоляція котушки	Лакотканинослюдoplast	0,25	1
2	Рамка	Склотекстоліт	0,5	1
3	Ізоляція котушки	Смуга скляна	0,1	1
4	Ізоляції осердя	Епоксидна смола	1	1

## 14. Розрахунок додаткового полюса

### Розрахунок комутації

При висоті осі обертання  $h_0 = 180 \text{ мм}$  реактивна ЕРС не повинна перевищувати  $5 \text{ В}$ .

Окружна швидкість якоря

$$g_a = \frac{\pi D_a \cdot n_{\text{н}}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,181 \cdot 1800}{60} = 17 \text{ м/с}.$$

Приведена питома магнітна провідність пазового розсіяння для відкритих пазів якоря

$$\lambda = 0,6 \cdot \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} + \frac{l_{\Pi}}{l_a} + \frac{2,5 \cdot a \cdot 10^8}{w_c \cdot A \cdot \mathcal{G}_a \cdot l_a \cdot p} =$$

$$= 0,6 \frac{24,1}{10,65} + \frac{204,9}{130} + \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 10^8}{29309 \cdot 17 \cdot 130 \cdot 2} = 4,86$$

Реактивна ЕРС

$$e_p = 2w_c \cdot \lambda \cdot A \cdot l_a \cdot \mathcal{G}_a \cdot 10^{-9} = 2 \cdot 1 \cdot 4,86 \cdot 29309 \cdot 130 \cdot 17 \cdot 10^{-9} = 0,63 \text{ В.}$$

### Вибір щіток

Ширина щітки

$$b_{\text{щ}} = (2 \dots 4) \cdot t_{\text{к}} = (7,5 \dots 15) \text{ мм.}$$

Із стандартного ряду вибираємо ширину щітки  $b_{\text{щ}} = 10 \text{ мм}$

Обираємо графітну щітку 6110М. При густині струму у щітці  $15 \text{ А/см}^2$  необхідна контактна поверхня усіх щіток одного щіткотримача

$$S_{\text{щб}} = \frac{I_{\text{ан}}}{p \cdot j_{\text{щ}}} \cdot 10^2 = \frac{158,7}{2 \cdot 15} \cdot 100 = 529 \text{ мм}^2.$$

Повна довжина щіток одного щіткотримача

$$l_{\text{щб}} = S_{\text{щб}} / b_{\text{щ}} = 529 / 10 = 52,9 \text{ мм.}$$

Приймаємо довжину щітки  $l_{\text{щ}} = 16 \text{ мм.}$

Необхідна кількість щіток на одному щіткотримачі

$$N_{\text{щб}} = \frac{S_{\text{щб}}}{b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}}} = \frac{529}{10 \cdot 16} = 3,3.$$

Приймаємо  $N_{\text{щб}} = 4$

Дійсна контактна поверхня усіх щіток одного щіткотримача

$$S_{\text{щб}} = N_{\text{щб}} \cdot b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}} = 4 \cdot 10 \cdot 16 = 640 \text{ мм}^2.$$

Густина струму під щіткою

$$j_{\text{щ}} = \frac{I_{\text{ан}}}{p \cdot S_{\text{щб}}} \cdot 10^2 = \frac{158,7}{2 \cdot 640} \cdot 10^2 = 12,4 \text{ А/см}^2.$$

Розміри графітної щітки 6110М -  $b_{щ} \times l_{щ} \times h_{щ} = 10 \times 16 \times 32$  мм, падіння напруги на пару щіток  $2\Delta U_{щ} = 2$  В, припустима окружна швидкість колектору  $\varrho_k = 90$  м/с, тиск на щітку  $P_{щ} = (12 \div 22)$  кПа.

Активна довжина колектора

$$l_k = N_{щ\sigma} (l_{щ} + 8) + 10 = 4(16 + 8) + 10 = 106 \text{ мм.}$$

Окружна швидкість колектора

$$\varrho_k = \frac{\pi D_k \cdot n_H}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,125 \cdot 1800}{60} = 11,8 \text{ м/с.}$$

Число колекторних пластин, перемкнутих щіткою,

$$\beta_{щ} = \frac{b_{щ}}{t_k} = \frac{10}{3,74} = 2,67.$$

*Розрахунок параметрів додаткового полюса*

Додатковий полюс виконуємо із сталі 3411. Число додаткових полюсів  $2p_d = 4$ . Довжина додаткового полюса дорівнює довжині якоря

$$l_{md} = l_a = 130 \text{ мм.}$$

Ширина зони комутації

$$b_{з.к.} = b_{щ} \frac{D_a}{D_k} + t_k \frac{D_a}{D_k} \left( u_n + \varepsilon_k - \frac{a}{p} \right) = 8 \cdot \frac{181}{125} + 3,74 \frac{181}{125} \left( 5 + 0,25 - \frac{1}{2} \right) = 37,3 \text{ мм.}$$

Ширина зони комутації повинна забезпечує співвідношення

$$\frac{b_{з.к.}}{\tau - b_{HP}} = \frac{37,3}{142,2 - 92,4} = 0,749.$$

Ширина полюсного наконечника

$$b_{pd} = 0,7 \cdot b_{з.к.} = 0,7 \cdot 37,3 = 26 \text{ мм}$$

Середнє значення індукції у повітряному зазорі під ДП

$$B_{\delta_d} = \frac{\kappa \cdot E_r \cdot 60}{2 \cdot w_c \cdot l_{pd} \cdot \pi \cdot D_a \cdot n_H} \cdot 10^6 = \frac{1,1 \cdot 0,631 \cdot 60}{2 \cdot 130 \cdot 3,14 \cdot 181 \cdot 1800} \cdot 10^6 = 0,157 \text{ Тл.}$$

*Розрахунок зазору під додатковим полюсом*



Повітряний зазор під додатковим полюсом

$$\delta_{\text{д}} = (2...3)\delta_{\text{еф}} = 4,5 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт повітряного зазору

$$k_{\delta_{\text{д}}} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_{\text{д}}}{t_1 - b_{\text{п}} + 10 \cdot \delta_{\text{д}}} = \frac{27 + 10 \cdot 4,5}{27 - 10,65 + 10 \cdot 4,5} = 1,17.$$

Попереднє значення МРС додаткового полюса

$$\begin{aligned} F_{\text{д}} &= A \cdot \frac{\tau}{2} \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 0,8 \cdot B_{\delta_{\text{д}}} \cdot k_{\delta_{\text{д}}} \cdot \delta_{\text{д}} \cdot 10^3 = \\ &= 29310 \cdot \frac{142,2}{2} \cdot 10^{-3} + 0,96 \cdot 0,157 \cdot 1,17 \cdot 4,5 \cdot 10^3 = 2877 \text{ А}, \end{aligned}$$

Кількість витків ОДП  $w_{\text{д}} = \frac{F_{\text{д}}}{I_{\text{ан}}} = \frac{2877}{158,7} = 18,1.$

Приймаємо  $w_{\text{д}} = 19$ , тоді додатковий полюс забезпечує МРС

$$F_{\text{д}} = w_{\text{д}} \cdot I_{\text{ан}} = 19 \cdot 158,7 = 3015 \text{ А}.$$

Приймаємо зазори під додатковим полюсом:

$$\delta_{\text{д а}} \approx 0,8\delta_{\text{д}} = 0,8 \cdot 4,5 = 3,6 \text{ мм} - \text{ зазор між полюсом та якорем};$$

$$\delta_{\text{д с}} = \delta_{\text{д}} - \delta_{\text{д а}} = 4,5 - 3,6 = 0,9 \text{ мм} - \text{ зазор між полюсом і станиною}.$$

Розрахункова ширина полюсного наконечника

$$b'_{\text{pd}} = b_{\text{pd}} + 2\delta_{\text{д}} = 26 + 2 \cdot 3,6 = 33,2 \text{ мм}.$$

Магнітний потік у повітряному зазорі під ДП

$$\Phi_{\text{д}} = b'_{\text{pd}} \cdot l_{\text{pd}} \cdot B_{\delta_{\text{д}}} \cdot 10^{-6} = 33,2 \cdot 130 \cdot 0,157 \cdot 10^{-6} = 0,00069 \text{ Вб}.$$

Значення потоку розсіяння ДП залежить від МРС і коефіцієнта магнітної провідності, значення якого уточнюється за ескізом вікна МПС, зображеним на рис. 12.7.

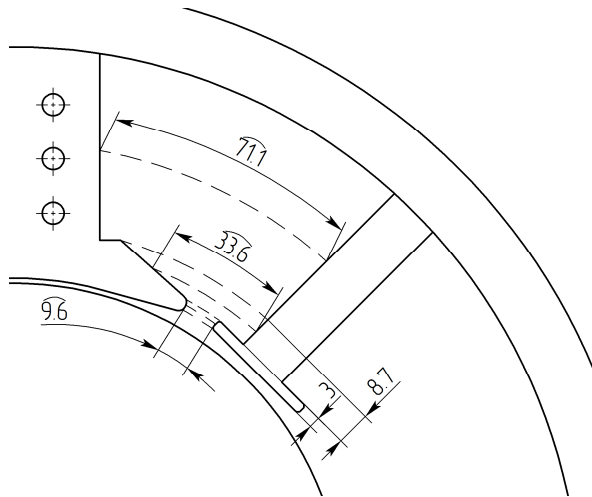


Рис. 12.7.  
Ескіз вікна  
магнітопроводу  
МПС  
при розрахунку  
коефіцієнта  
магнітної  
провідності  
розсіяння

Наближене значення коефіцієнта магнітної провідності

$$\lambda_{\text{д}} = \frac{H'}{L'} + \frac{H''}{L''} + 0,75 \frac{H'''}{L'''} = \frac{3}{9,6} + \frac{8,7}{33,6} + 0,75 \frac{58}{71,1} = 1,18.$$

Питома магнітна провідність шляху потоку розсіяння ДП

$$\Lambda_{\sigma_{\text{д}}} = \mu \cdot \lambda_{\text{д}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,18 = 1,48 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Потік розсіяння додаткового полюса

$$\Phi_{\sigma_{\text{д}}} = 2 \cdot F_{\text{д}} \cdot l_{\text{рпд}} \cdot \Lambda_{\sigma_{\text{д}}} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 3015 \cdot 130 \cdot 1,48 \cdot 10^{-9} = 0,00116 \text{ Вб.}$$

Повний потік в осерді додаткового полюса

$$\Phi_{\text{мд}} = \Phi_{\sigma_{\text{д}}} + \Phi_{\text{д}} = 0,00116 + 0,00069 = 0,00185 \text{ Вб.}$$

Коефіцієнт розсіяння додаткового полюса

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\Phi_{\text{мд}}}{\Phi_{\text{д}}} = \frac{0,00185}{0,00069} = 2,7.$$

Висота додаткового полюса

$$h_{\text{д}} = \frac{D_{\text{вс}} - D_{\text{а}}}{2} - \delta_{\text{д}} = \frac{311,6 - 181}{2} - 4,5 = 61 \text{ мм.}$$

Індукція в осерді додаткового полюса при дворазових перевантаженнях не повинна перевищувати 1,6Тл, тому індукція у ДП приймається  $B_{\text{мд}} = 0,8 \text{ Тл}$ , тоді площа перерізу магніту ДП

$$S_{\text{мд}} = \frac{\Phi_{\text{мд}}}{B_{\text{мд}}} 10^6 = \frac{0,00185}{0,8} 10^6 = 2313 \text{ мм}^2.$$

Ширина осердя додаткового полюса

$$b_{\text{мд}} = \frac{S_{\text{мд}}}{l_{\text{рд}}} = \frac{2313}{130} = 18 \text{ мм.}$$

*Обмотка додаткового полюса (ОДП)*

Струм якоря не перевищує 1000 А, тому кількість паралельних гілок обмотки ДП  $a_{\text{д}} = 1$ . Приймаємо густину струму в обмотці ДП

$$J_{\text{д}} = 5 \text{ А/мм}^2.$$

Попередня площа перерізу провідника ОДП

$$q'_{\text{пр д}} = \frac{I_{\text{ан}}}{a_{\text{д}} \cdot J_{\text{д}}} = \frac{158,7}{1 \cdot 5} = 31,745 \text{ мм}^2.$$

Для класу ізоляції  $F$  використовується неізольована шинна мідь. При цьому одношарова котушка намотана шиною на вузьку сторону. За сортаментом обираємо шину з перерізом  $q_{\text{пр д}} = 31,9 \text{ мм}^2$ , зі сторонами

$$a \times b = 1,81 \times 18 \text{ мм.}$$

Середня довжина витка ОДП

$$\begin{aligned} l_{\text{в д}} &= 2l_{\text{мд}} + \pi (b_{\text{мд}} + b_{\text{прд}} + 2 \cdot b_{\text{ід}} + 2 \cdot b_{\text{зд}}) = \\ &= 2 \cdot 130 + \pi (17,5 + 18 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3) = 385 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Опір обмотки ДП при 115 °С

$$r_{\text{д}} = \rho \frac{2p \cdot w_{\text{д}} \cdot l_{\text{в д}}}{S_{\text{пр д}}} 10^3 = 24 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{4 \cdot 19 \cdot 385}{31,9} \cdot 10^3 = 0,022 \text{ Ом.}$$

Остаточна густина струму ОДП

$$J_{\text{д}} = \frac{I_{\text{ан}}}{a_{\text{д}} \cdot q_{\text{пр д}}} = \frac{158,7}{1 \cdot 31,9} = 4,98 \text{ А/мм}^2.$$

## 15. Оцінка якості розрахунку додаткового полюса

*Перевірка збільшення індукції від накладання потоків головного та додаткового полюсів*

У станині та спинці якоря є ділянки, у яких магнітні потоки полюсів головного і додаткового додаються, тому необхідно врахувати збільшення індукції, яка для спинки якоря

$$B_a = \frac{\Phi + 1,5 \cdot \Phi_{\text{д}}}{2 \cdot h_a \cdot l_a \cdot k_c} \cdot 10^6 = \frac{0,0083 + 1,5 \cdot 0,0007}{2 \cdot 39 \cdot 130 \cdot 0,95} \cdot 10^6 = 0,99 \text{ Тл}.$$

Збільшення індукції у станині

$$B_c = \frac{\Phi + 1,5 \cdot \Phi_{\text{мд}}}{2 \cdot h_c \cdot l_c} = \frac{0,0083 + 1,5 \cdot 0,00182}{2 \cdot 18 \cdot 222,4} = 1,38 \text{ Тл}.$$

Індукція у станині не перевищує 1,4 Тл, у спинці якоря – 1,6 Тл, тобто магнітний потік ДП не викликає насичення магнітної системи машини.

### ***Розрахунок характеристики намагнічування ДП***

Більш точно перевірка стану магнітного кола МПС при перенавантаженні виконується побудовою залежності ЕРС  $e_k = f(I_a)$ .

За значенням індукції  $B_k = B_{\delta\text{д}}$  характеристики  $B_k = f(I_{\text{д}})$  (рис. 12.8) для номінального режиму роботи можна знайти точку, що визначає значення реактивної ЕРС  $e_r$ .

Задаючись значеннями індукції в зазорі під ДП  $B_{\text{к1}} > B_k$ , можна визначити за прямою  $e_r = f(I_{\text{д}})$  (рис. 12.8) струм якоря  $I_{a1}$ , необхідний для компенсації реактивної ЕРС.

Для визначення струму намагнічування ДП  $I_{\text{д1}}$  розраховуємо лінійне навантаження якоря,  $A$ ,

$$A_{a1} = A_a \cdot \frac{I_{a1}}{I_{an}};$$

корисний потік ДП,  $B\delta$ ,

$$\Phi_{\text{к1}} = \Phi_{\text{д1}} \cdot \frac{B_{\text{к1}}}{B_k};$$

потік у стрижні ДП,  $B\delta$ ,

$$\Phi_{\text{к1}} = \Phi_{\text{д1}} \cdot \sigma_{\text{д}};$$

магнітну індукцію в стрижні ДП,  $Tл$ ,

$$B_{\text{мд1}} = B_{\text{мд}} \cdot \frac{\Phi_{\text{мд1}}}{\Phi_{\text{мд}}};$$

МРС зазору між ДП та якорем,  $A$ ,

$$F_{\delta\text{да1}} = 0,8 \cdot B_{\text{к1}} \cdot \delta_{\text{да}} \cdot k_{\delta\text{д}} \cdot 10^3;$$

$$\text{де } k_{\delta_d} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_d}{t_1 - b_p + 10 \cdot \delta_d} = \frac{27 + 10 \cdot 3,5}{27 - 10,65 + 10 \cdot 3,5} = 1,2,$$

МРС зазору між ДП та станиною,  $A$ ,

$$F_{\delta_{дс1}} = 0,8 \cdot B_{мд1} \cdot \delta_{дс} \cdot \frac{b_{мд}}{(b_{мд} + 2\delta_{дс})} 10^3;$$

МРС стрижня ДП,  $A$ ,

$$F_{мд1} = 0,8 \cdot H_{мд1} \cdot h_d \cdot 10^{-3};$$

магнітну індукцію в станині,  $Tл$ ,

$$B_{сд1} = \frac{\Phi_{мд1}}{2 \cdot h_c \cdot l_c} 10^6;$$

МДС станини від потоку ДП,  $A$ ,

$$F_{мд1} = H_{сд1} \cdot L_c \cdot 10^{-3};$$

магнітну індукцію в зубцях якоря,  $Tл$ ,

$$B_{зд1} = B_{зср} \cdot \frac{B_{к1}}{B_{\delta}};$$

МРС зубців якоря,  $A$ ,

$$F_{зд1} = H_{зд1} \cdot h_{п} \cdot 10^{-3};$$

магнітну індукцію в спинці якоря,  $Tл$ ,

$$B_{jd1} = \frac{\Phi_{д1}}{2 \cdot h_j \cdot l_{ст} \cdot k_c} 10^6;$$

МРС спинки якоря,  $Tл$ ,

$$F_{jd1} = H_{jd1} \cdot L_j \cdot 10^{-3};$$

струм намагнічування додаткових полюсів, необхідний для компенсації МРС на лінії геометричної нейтралі і реактивної ЕРС,  $A$ ,

$$I_{д1} = \frac{A_{a1} \frac{\tau}{2} 10^{-3} + F_{\delta_{да1}} + F_{\delta_{дс1}} + F_{зд1} + F_{мд1} + F_{сд1} + F_{jd1}}{w_d}.$$

Результати розрахунку зведені у табл. 12.4.  
 Залежність  $B_K = f(I_a)$  зображена на рис. 12.8.

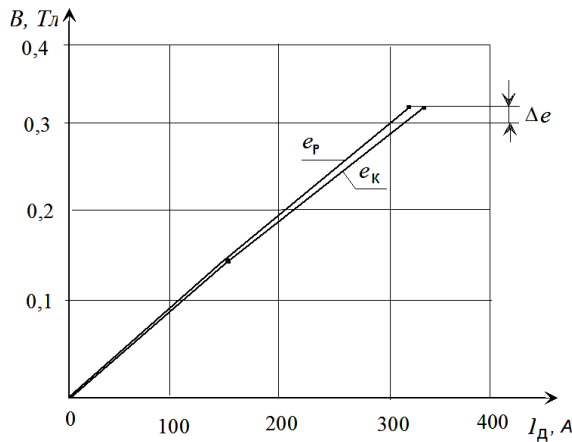


Рис. 12.8.  
 Залежність  
 індукції  
 від струму  
 намагнічування

Як видно з рис. 12.8, при струмі якоря  $2I_{ан} = 2 \cdot 158,7 = 317,45 \text{ A}$ ,  
 $e_p = 0,313$ ,  $e_k = 0,3$  і величина  $\Delta e$

$$\Delta e = \frac{e_p - e_k}{e_p} \cdot 100 = \frac{0,313 - 0,3}{0,313} \cdot 100 = 4,2 \%,$$

що не перевищує 5 %, отже, зазор під ДП обрано необхідної величини.

Таблиця 12.4

Результати розрахунку характеристики намагнічування

$B_{кд1}, \text{Тл}$	0,125	0,157	0,188	0,235	0,313
$I_{a1}, \text{А}$	127	158,7	190,4	238	317,4
$A_{a1}, \text{А/м}$	23447	29310	35171	43964	58618
$\Phi_{д1}, \text{Вб}$	0.0005	0,00072	0,00086	0,00107	0,00144
$\Phi_{мд1}, \text{Вб}$	0,0014	0,00182	0,0022	0,00272	0,0036
$B_{мд1}, \text{Тл}$	0,62	0,8	0,97	1,2	1,58
$F_{\delta да1}, \text{А}$	468	586	704	880	1172
$F_{\delta дс1}, \text{А}$	241	300	361	452	601
$H_{мд1}, \text{А/м}$	525	682	873	1290	4100
$F_{мд1}, \text{А}$	32	42	52	79	250
$B_{сд1}, \text{Тл}$	0.158	0,197	0,237	0,296	0,395
$H_{сд1}, \text{А/м}$	126	157,8	189	236	316

$F_{сд1}, A$	28	35,1	42	52,6	70,2
$B_{зд1}, Tл$	0,279	0,35	0,42	0,522	0,696
$H_{зд1}, A/м$	45,6	51,9	57	64,5	77,7
$F_{зд1}, A$	1,1	1,25	1,38	1,55	1,87
$B_{jd1}, Tл$	0,058	0,0724	0,087	0,109	0,144
$H_{jd1}, A/м$	13	15,9	18,7	22,7	28,67
$F_{jd1}, A$	1,7	2,1	2,4	2,94	3,7
$A_{a1} \cdot \tau / 2, A/м$	1667	2102	2523	3156	4167
$\Sigma F_i, A$	2439	3050	3640	4566	6275
$I_{д1}, A$	129	161	192	240	330

### Розрахунок фактора іскріння

Складові магнітної провідності розсіяння:

– провідність пазового розсіяння

$$\lambda_{п1} = \frac{H_{11}}{3b_{п2}} = \frac{22,1}{3 \cdot 10,65} = 0,69;$$

$$\lambda_{п2} = \frac{H_2}{3 \cdot b_{п2}} = \frac{3,6}{3 \cdot 10,65} = 0,113;$$

– провідність по коронках зубців

$$\lambda_{к} = \frac{b_{pd} - b_{md}}{4 \cdot \delta_{д} \cdot k_{\delta д}} = \frac{34 - 14,5}{4 \cdot 3,5 \cdot 1,2} = 1,16;$$

– провідність лобового розсіяння при немагнітних бандажах

$$\begin{aligned} \lambda_{л} &= 0,37 \cdot \frac{l_{л}}{l_a} \cdot \log \left( 1 + \pi \frac{\tau}{4 \cdot h_n} \right) = \\ &= 0,37 \cdot \frac{204,9}{130} \cdot \log \left( 1 + 3,14 \frac{142,16}{4 \cdot 24,1} \right) = 0,438. \end{aligned}$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіяння

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{п1} + \lambda_{п2} + \lambda_{к} + \lambda_{л} = 0,692 + 0,063 + 1,16 + 0,438 = 2,36.$$

Індуктивність секції обмотки якоря

$$L_c = 2w_c^2 \cdot l_a \cdot \Lambda_\sigma \cdot \mu_0 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 130 \cdot 2,54 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} = 8,3 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}$$

Опір щіткового контакту

$$R_{\text{щ}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{ан}}} \cdot p \cdot \beta_{\text{щ}} = \frac{2}{158,7} \cdot 2 \cdot 2,67 = 0,056 \text{ Ом.}$$

Опір секції ОЯ

$$r_c = \rho \cdot \frac{w_c \cdot l_{\text{ва}}}{S_{\text{пр}}} \cdot 10^3 = 24 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1 \cdot 669,9}{13,39} \cdot 10^3 = 0,0012 \text{ Ом.}$$

Струм комутованої секції

$$i_k = e_p \cdot \frac{k_o \cdot k_r}{R_{\text{щ}} + r_c} = 0,631 \cdot \frac{2 \cdot 0,13}{0,056 + 0,0012} = 2,97 \text{ А.}$$

Фактор іскріння

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \left( \frac{400}{D_k} \right)^{1,5} \frac{L_c \cdot i_k^2}{2} \frac{g_k}{t_k \cdot l_{\text{щ}} \cdot N_{\text{щб}}} = \\ &= \left( \frac{400}{125} \right)^{1,5} \frac{8,28 \cdot 10^{-7} \cdot 2,97^2}{2} \frac{11,8}{3,74 \cdot 16 \cdot 4} \cdot 10^4 = 0,0103. \end{aligned}$$

Знайдене значення фактора іскріння відповідає класу комутації  $1\frac{1}{4}$ , який є допустимим для тривалої роботи МПС.

## 16. Розміщення обмоток полюсів у вікні машини

Обмотку паралельного збудження виконуємо однією котушкою, послідовна обмотка і обмотка додаткових полюсів одношарові по ширині. Ескіз розташування обмоток у вікні магнітопроводу зображено на рис. 12.9.



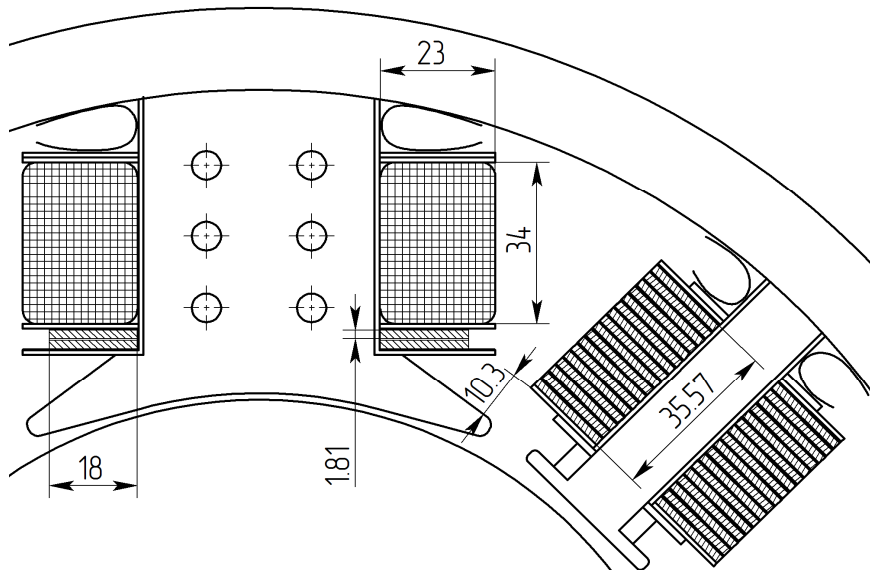


Рис. 12.9. Ескіз вікна МПС з розміщеними обмотками

Попереднє значення площі, яку займає шунтова обмотка збудження,

$$S_{\text{Ш}} = 1,2(d_{\text{Ш}i3})^2 \cdot w_{\text{Ш}} = 1,2 \cdot 1,26^2 \cdot 406 = 773 \text{ мм}^2.$$

Попереднє значення висоти котушки з круглого ізолюваного проводу

$$h_{\text{к}} = 1,05N_{\text{в}} \cdot d_{\text{Ш}i3} + h_{i3} = 1,05 \cdot 25 \cdot 1,26 + 0,7 = 34 \text{ мм}.$$

Попереднє значення ширини котушки з круглого ізолюваного проводу

$$b_{\text{к}} = 1,05N_{\text{ш}} \cdot d_{\text{Ш}i3} + b_{i3} = 1,05 \cdot 16 \cdot 1,26 + 1,7 = 23 \text{ мм},$$

де  $b_{i3} = 1,7 \text{ мм}$ ,  $h_{i3} = 0,7 \text{ мм}$  – розміри ізоляційних прокладок і каркасу котушки по ширині та висоті;  $N_{\text{в}} = 25$ ,  $N_{\text{ш}} = 16$  число витків по висоті та ширині котушки.

За розташуванням обмоток у вікні машини слід уточнити середню довжину витка обмоток.

Шунтова обмотка збудження

$$l_{\text{вШ}} = 2 \cdot (l_a + \pi 36,86) = 2 \cdot (130 + \pi \cdot 36,86) = 492 \text{ мм}.$$

Обмотка додаткового полюса (одношарова обмотки ДП)

$$l_{\text{вД}} = 2 \cdot (l_a + \pi 17,24) = 2 \cdot (130 + \pi \cdot 17,24) = 362 \text{ мм}.$$

Стабілізуюча обмотка середня довжина витка

$$l_{\text{вС}} = 2 \cdot (l_a + \pi 33,92) = 2 \cdot (130 + \pi \cdot 33,92) = 473 \text{ мм}.$$

## 17. Розрахунок втрат і ККД

Маса сталі зубців якоря з прямокутними відкритими пазами

$$\begin{aligned} m_Z &= 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot z_1 \cdot b_Z \cdot h_{\text{П}} \cdot l_a \cdot 0,95 = \\ &= 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 21 \cdot 12,8 \cdot 24,1 \cdot 130 \cdot 0,95 = 6,25 \text{ кг} \end{aligned}$$

Якір виконано зі сталі 2412, для якої питомі втрати  $\Delta p_0 = 1,75 \text{ Вт / кг}$ .

Маса сталі спинки якоря

$$\begin{aligned} m_j &= 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi}{4} \left[ (D_a - 2h_{\text{П}})^2 - D_B^2 \right] \cdot l_a \cdot k_c = \\ &= 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi}{4} \left[ (181 - 2 \cdot 24,1)^2 - 56^2 \right] \cdot 130 \cdot 0,95 = 11 \text{ кг} \end{aligned}$$

$\beta = 1,4$  – для електротехнічної холоднокатаної сталі при товщині листів якоря 0,5 мм.

Магнітні втрати у зубцях

$$\Delta p_Z = 2,3 \cdot \Delta p_0 \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^\beta B_Z^2 \cdot m_Z = 2,3 \cdot 1,75 \cdot \left( \frac{60}{50} \right)^{1,4} \cdot 1,51^2 \cdot 6,25 = 74 \text{ Вт}.$$

Магнітні втрати у спинці якоря

$$\Delta p_j = 2,3 \cdot \Delta p_0 \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^\beta B_j^2 \cdot m_j = 2,3 \cdot 1,75 \cdot \left( \frac{60}{50} \right)^{1,4} \cdot 0,879^2 \cdot 11 = 44 \text{ Вт}.$$

Поверхневі втрати в усіх полюсних наконечниках

$$\Delta p_{\text{ПОВ}} = 2\rho \cdot \tau \cdot \alpha_\delta \cdot l_p \cdot \Delta p_{\text{ПТ}} \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 142,1 \cdot 0,65 \cdot 130 \cdot 956 \cdot 10^{-6} = 46 \text{ Вт},$$

де питомі поверхневі втрати

$$\Delta p_{\text{ПТ}} = \kappa_0 \cdot \left( \frac{z_1 \cdot n_{\text{Н}}}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_1)^2 = 1,7 \cdot \left( \frac{21 \cdot 1800}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,324 \cdot 27)^2 = 956 \text{ Вт / м}^2.$$

Амплітуда коливання магнітної індукції

$$B_0 = 0,31 \cdot B_\delta \cdot k_\delta = 0,31 \cdot 0,69 \cdot 1,51 = 0,324 \text{ Тл};$$

Сумарні магнітні втрати в сталі

$$\Sigma \Delta p_{\text{СТ}} = \Delta p_Z + \Delta p_j + \Delta p_{\text{ПОВ}} = 74 + 44 + 46 = 164 \text{ Вт}.$$

Втрати на тертя щіток об колектор

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{тщ}} &= 9,81 \cdot c_{\text{тщ}} \cdot f_{\text{тщ}} \cdot S_{\text{тщ}\Sigma} \cdot g_{\text{к}} \cdot 10^{-2} = \\ &= 9,81 \cdot 0,2 \cdot 0,15 \cdot 4 \cdot 640 \cdot 11,78 \cdot 10^{-2} = 170 \text{ Вт}\end{aligned}$$

Втрати у підшипниках і на вентиляцію прийнято  $P_{\text{вен}} = 110 \text{ Вт}$ .

Сумарні механічні втрати

$$\Sigma \Delta p_{\text{мех}} = \Delta p_{\text{вен}} + \Delta p_{\text{тщ}} = 110 + 170 = 280 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати в обмотці якоря

$$\Delta p_{\text{еа}} = I_{\text{ан}}^2 \cdot r_{\text{а}} = 158,7^2 \cdot 0,0315 = 794 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати в стабілізуючій обмотці

$$\Delta p_{\text{ес}} = I_{\text{ан}}^2 \cdot r_{\text{ст}} = 158,7^2 \cdot 0,00274 = 69 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати в обмотці додаткових полюсів

$$\Delta p_{\text{ед}} = I_{\text{ан}}^2 \cdot r_{\text{д}} = 158,7^2 \cdot 0,0198 = 495 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати у перехідному контактi щіток

$$\Delta p_{\text{ещ}} = I_{\text{ан}} \cdot 2\Delta U_{\text{щ}} = 158,7 \cdot 2 = 317 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати у шунтовій обмотці

$$\Delta p_{\text{еш}} = U_{\text{н}}^2 / r_{\text{ш}} = 110^2 / 19,6 = 617 \text{ Вт}.$$

Сумарні електричні втрати у машині

$$\begin{aligned}\Sigma \Delta p_{\text{е}} &= \Delta p_{\text{еа}} + \Delta p_{\text{еш}} + \Delta p_{\text{ес}} + \Delta p_{\text{ед}} + \Delta p_{\text{ещ}} = \\ &= 794 + 617 + 69 + 495 + 317 = 2292 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

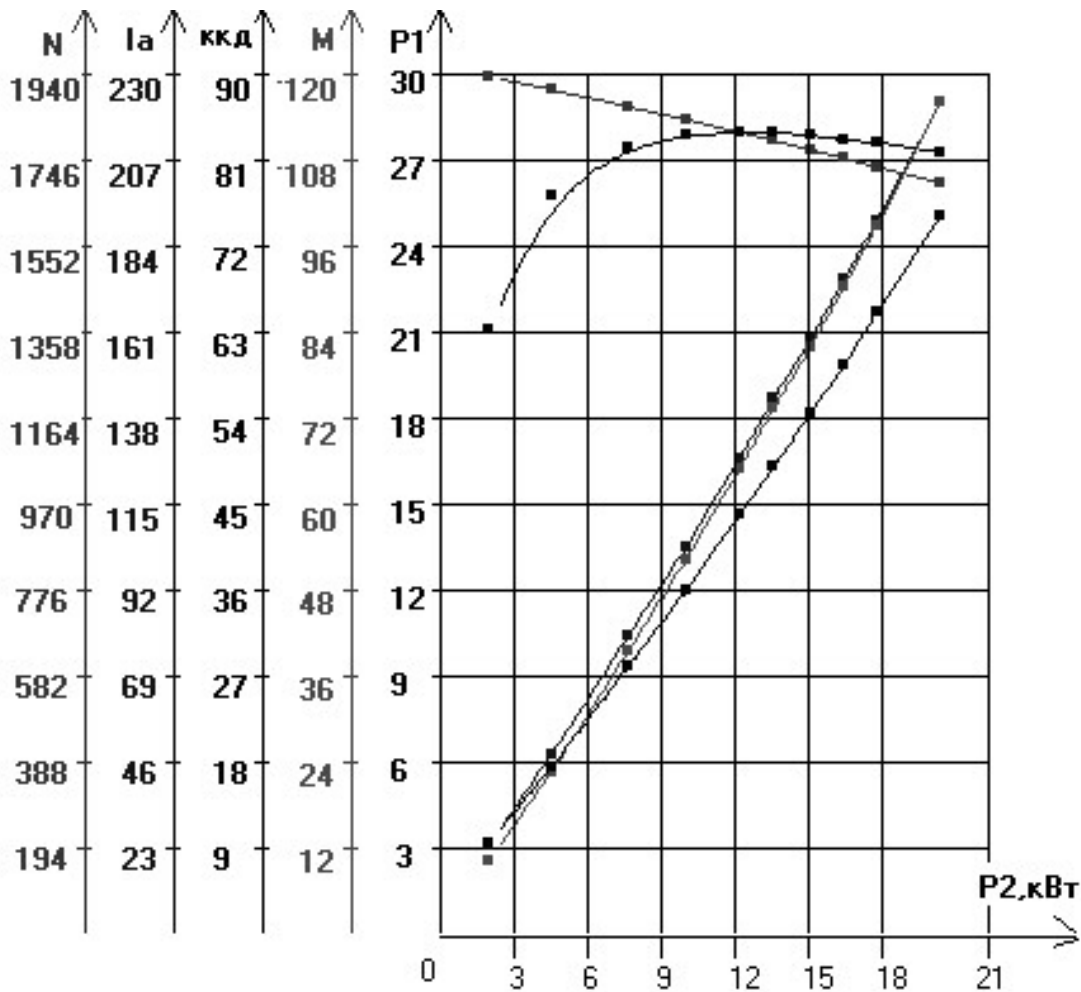
Додаткові втрати

$$\Delta p_{\text{дод}} = 0,01 \cdot P_1 = 0,01 \cdot 15500 = 155 \text{ Вт}.$$

Сумарні втрати

$$\Sigma \Delta p = \Sigma \Delta p_{\text{е}} + \Sigma \Delta p_{\text{ст}} + \Sigma \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{дод}} = 2292 + 164 + 280 + 155 = 2891 \text{ Вт}.$$

*Рис.12.10.  
Робочі  
характери-  
стики*



Споживана потужність

$$P_1 = U_H \cdot I_{ан} + P_{еш} = 110 \cdot 159 + 617 = 18107 \text{ Вт.}$$

ККД машини

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{P_1} = 1 - \frac{2891}{18197} = 0,841.$$

Повністю робочі характеристики розраховуються на ПК (Додаток Д).

### 18. Розрахунок двигуна при максимальній швидкості

При задній кратності регулювання частоти обертання вверх від номіналу ( $n_{\max}^* = 2,3$ ) мінімальна індукція у повітряному зазорі

$$B_{\delta \min} = \frac{B_{\delta}}{2,3} = \frac{0,69}{2,3} = 0,3 \text{ Тл.}$$

За характеристикою перехідного шару при мінімальному потоці МРС перехідного шару становить 750 А. Коефіцієнт стабільної роботи

$$k_{\text{ст}} = \frac{F_{\delta zj \text{ min}}}{0,5 \cdot A_{\text{H}} \cdot b_{\text{p}} \cdot 10^{-3}} = \frac{750}{0,5 \cdot 29309 \cdot 92,4 \cdot 10^{-3}} = 0,55 > 0,4.$$

Реакція якоря визначається за перехідною характеристикою (рис. 12.11).

Середнє значення індукції під частиною полюсної дуги з основним направленням магнітного потоку

$$B_{\delta \text{ пр}} = \frac{1}{6} [D'F' + 4 \cdot KL] = \frac{1}{6} [0,725 + 4 \cdot 0,425] = 0,41 \text{ Тл.}$$

Середнє значення індукції під частиною полюсної дуги із зустрічним направленням магнітного потоку

$$B_{\delta \text{ зв}} \approx \frac{1}{2} AC = \frac{1}{2} 0,26 = 0,13 \text{ Тл.}$$

Середнє значення індукції в повітряному зазорі під головним полюсом

$$B_{\delta \text{ сер}} = B_{\delta \text{ пр}} - B_{\delta \text{ зв}} = 0,41 - 0,13 = 0,28 \text{ Тл.}$$

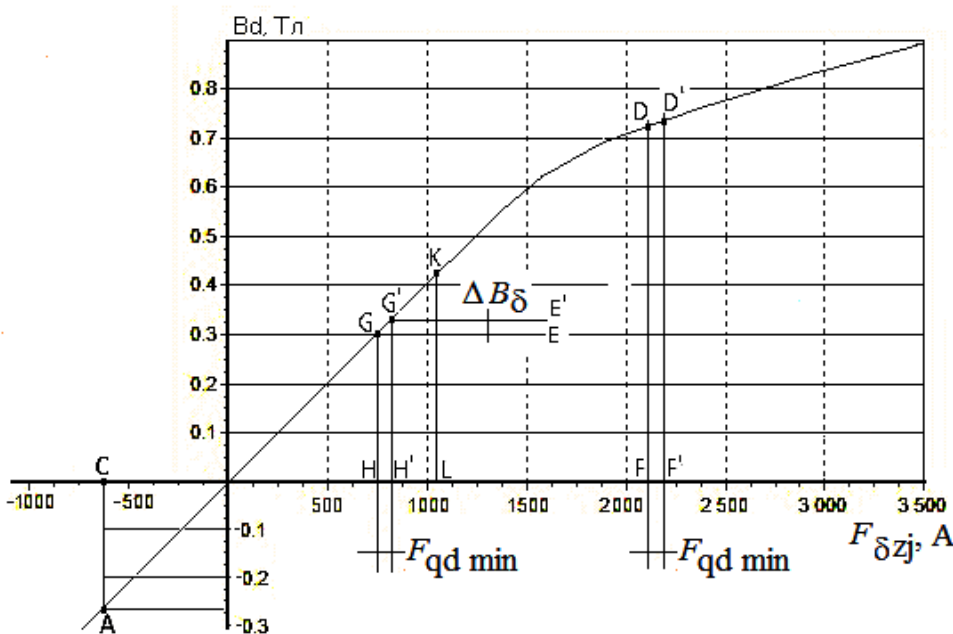


Рис. 12.11.  
Перехідна  
характеристика  
при  
мінімальному  
потоці

Зменшення індукції у повітряному зазорі, Тл,

$$\Delta B_{\delta} = B_{\delta \text{ min}} - B_{\delta \text{ сер}} = 0,3 - 0,28 = 0,02 \text{ Тл.}$$

МРС, еквівалентна реакції якоря, що розмагнічує, при перекиданні магні-

тного поля якоря за рис. 12.11 –

$$F_{qd \min} = \overline{HH'} = 65 \text{ A}.$$

Максимальне значення індукції при мінімальному потоці ( $D'F'$  на рис. 12.11) знаходимо з урахуванням реакції якоря  $B_{\delta \max} = 0,735 \text{ Тл}$ .

Коефіцієнт перекручування магнітного поля

$$k_i = \frac{B_{\delta \max}}{B_{\delta \min}} = \frac{0,735}{0,3} = 2,45.$$

Напруга між колекторними пластинами

$$U_{\text{к max}} = U_{\text{к}} \cdot \frac{k_i}{\alpha_{\delta}} = 4,19 \cdot \frac{2,53}{0,65} = 16,28 \text{ В} < 50 \text{ В}.$$

Мінімальній індукції відповідає

$$F_{\Sigma \min} = 825 \text{ A}.$$

МРС збудження, необхідна при мінімальному потоці,

$$F_3 \min = F_{\Sigma \min} + F_{qd \min} = 825 + 65 = 890 \text{ A}.$$

## 19. Розрахунок регулювальних характеристик при регулюванні частоти обертання вверх від номіналу

За розрахованими на ПК характеристиками  $B_{\delta} = \varphi(F_{\delta zj})$ ,

$B_{\delta} = \varphi(F_{\Sigma})$ ,  $c\Phi = \varphi(F_{\Sigma})$ , задавшись значеннями індукції від  $B_{\delta \min}$  до  $B_{\delta}$  визначаємо сумарні МРС, яким відповідають значення  $c\Phi$ . Характеристики зображено на рис. 12.12.

Розрахунок ведеться для точки  $B_{\delta} = 0,3 \text{ Тл}$ , якій відповідає сумарна МРС  $F_{\Sigma} = 805 \text{ A}$ , за її значенням  $c\Phi = 0,237 \text{ Вб}$ , реакція якоря  $F_{qd} = 83 \text{ A}$ .

МРС збудження основних полюсів

$$F_3 = F_{\Sigma} + F_{qd} = 825 + 65 = 890 \text{ A}.$$

МРС шунтової обмотки

$$F_{\text{ш}} = F_{\Sigma} - F_{\text{ст}} = 890 - 317 = 573 \text{ A}.$$

Струм шунтової обмотки

$$I_{\text{ш}} = \frac{F_{\text{ш}}}{W_{\text{ш}}} = \frac{573}{406} = 1,41 \text{ A.}$$

Опір регулювального реостату в колі шунтової ОЗ

$$R_{\text{пр}} = 1,3 \left( \frac{U_3}{I_{\text{ш}}} - R_{\text{ОЗ}} \right) = 1,3 \left( \frac{110}{1,41} - 19,3 \right) = 77 \text{ Ом.}$$

Кутова швидкість неробочого ходу

$$\omega_0 = \frac{U}{c\Phi} = \frac{110}{0,5544} = 198,4 \text{ c}^{-1}.$$

Кутова швидкість у номінальному режимі

$$\omega = \frac{E_{\text{н}}}{c\Phi} = \frac{99,4}{0,237} = 419 \text{ c}^{-1}.$$

Момент на валу

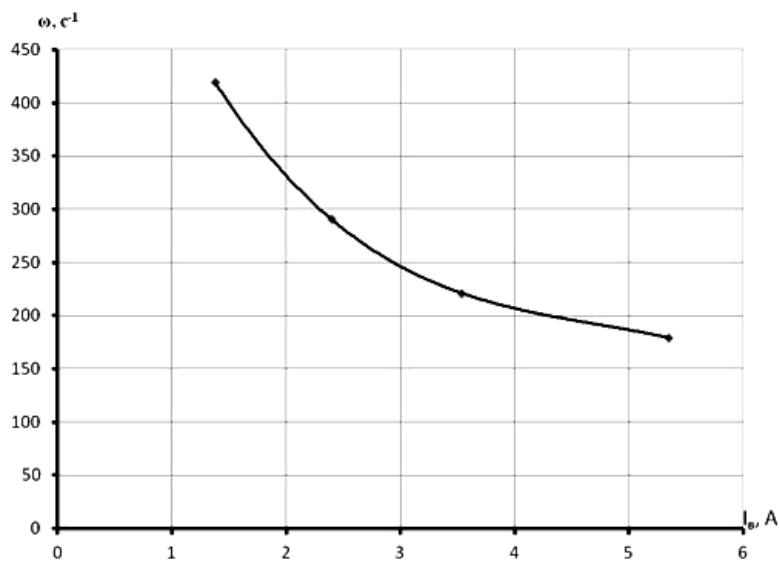
$$M_2 = \frac{P_{\text{н}}}{\omega} = \frac{15500}{419} = 37 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Розрахунок решти точок зведено до табл. 12.5, характеристики зображено на рис. 12.12.

Таблиця 12.5

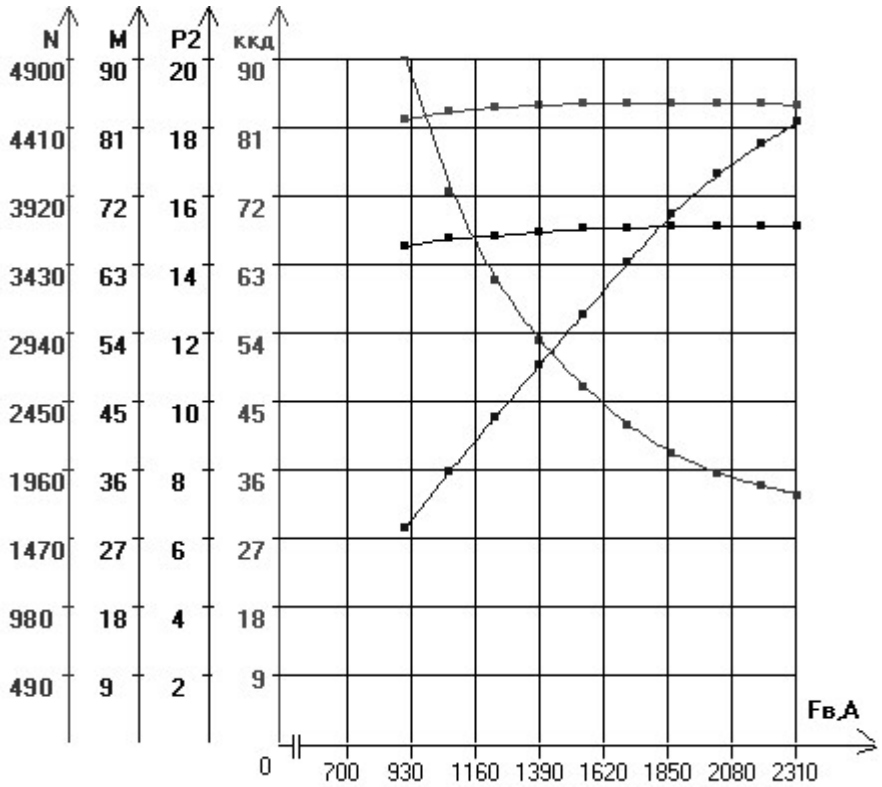
Характеристики при регулюванні вверх від номіналу

Точка	1	2	3	4
$B_{\delta}, \text{Тл}$	0,3	0,427	0,5588	0,69
$F_{\Sigma}, \text{А}$	825	1164	1573	2215
$c\Phi, \text{Вб}$	0,237	0,342	0,45	0,554
$F_{qd}, \text{А}$	65	124,3	182	275
$F_{\text{ш}}, \text{А}$	561	971	1438	2172
$\omega, \text{c}^{-1}$	419	290	221	184
$I_{\text{ш}}, \text{А}$	1,4	2,4	3,5	5,4
$M_2, \text{Н} \cdot \text{м}$	37	53,4	70,1	86,5



*Рис. 12.12.  
Характеристика  
 $\omega = \varphi(I_3)$   
при  
регулюванні  
уверх від номі-  
налу*

Повністю характеристики двигуна при регулюванні частоти обертання (рис.12.13) розраховуються на ПК (Додаток Д).



*Рис. 12.13.  
Характеристики  
при регулюванні  
частоти  
обертання  
зменшенням  
магнітного  
потіку*

## 20. Розрахунок регулювальних характеристик при регулюванні частоти обертання вниз від номінальної

При регулюванні швидкості вниз від номіналу зниженням напруги для двигунів із системою вентиляцією IC01 необхідно зменшувати момент на валу. Економічно доцільно одночасно зменшувати струм якоря і магнітний потік. Мінімальна швидкість обертання двигуна



$$n_{\min} = 0,2 \cdot n_H = 0,2 \cdot 1800 = 360 \text{ об / хв.}$$

Розглянемо точки від мінімальної до основної швидкості із значеннями  $(0,2; 0,4; 0,8; 1)n_H$ , відповідні зменшення моменту  $(0,62; 0,77; 0,93; 1)M_H$ . Для  $n = 0,2 \cdot n_H$  момент складає  $0,62 \cdot M_H$ , струм якоря приймає значення

$$I_a = I_{aH} \cdot \sqrt{M_2/M_H} = 158,7 \sqrt{0,62} = 125 \text{ A.}$$

Основний магнітний потік

$$c\Phi = c\Phi_H \cdot \sqrt{M_2/M_H} = 0,5544 \sqrt{0,62} = 0,4366 \text{ Вб.}$$

Електрорушійна сила

$$E_a = c\Phi \cdot \omega = 0,4366 \cdot 35,8 = 15,64 \text{ В.}$$

Напруга живлення

$$\begin{aligned} U &= E_a + I_a \cdot (r_a + r_d + r_{ст}) + \Delta U_{ш} = \\ &= 15,64 + 125 \cdot (0,0315 + 0,0197 + 0,0033) + 2 = 24,4 \text{ В.} \end{aligned}$$

Розрахованому значенню потоку відповідає сумарна МРС  $F_\Sigma = 1518 \text{ A}$ .

Магніторушійна сила основних полюсів

$$F_3 = F_\Sigma + F_{qd} = 1518 + 198 = 1716 \text{ A.}$$

МРС шунтової обмотки

$$F_{ш} = F_3 - F_c = 1716 - 250 = 1466 \text{ A,}$$

де  $F_{qd}$  – МРС, еквівалентна реакції якоря, яка приблизно

$$F_{qd} = F_{qdH} \frac{I_a}{I_{aH}} = 251 \cdot \frac{125}{158,7} = 198 \text{ A.}$$

Струм шунтової обмотки

$$I_{ш} = \frac{F_{ш}}{w_{ш}} = \frac{1466}{406} = 3,6 \text{ A.}$$

Розрахунок решти точок зведено до табл. 12.6, характеристики зображені на рис. 12.14.

Таблиця 12.6

## Результати розрахунку при регулюванні вниз від номіналу

Точки	1	2	3	4
$\omega^*$	0,2	0,4	0,8	1
$\omega, \text{рад/с}$	37	74	147	184
$M_2^*$	0,62	0,77	0,93	1
$I_a, A$	125	139,3	153	158,7
$c\Phi, Bб$	0,437	0,487	0,535	0,554
$E_a, B$	15,64	34,9	76,7	99,4
$U, B$	24,4	44,5	87	110
$F_{qd}, A$	198	220	243	251
$F_{\Sigma}, A$	1518	1747	2031	2215
$F_{CT}, A$	250	279	306	317
$F_{III}, A$	1466	1689	1967	2172
$I_{III}, A$	3,61	4,16	4,85	5,4

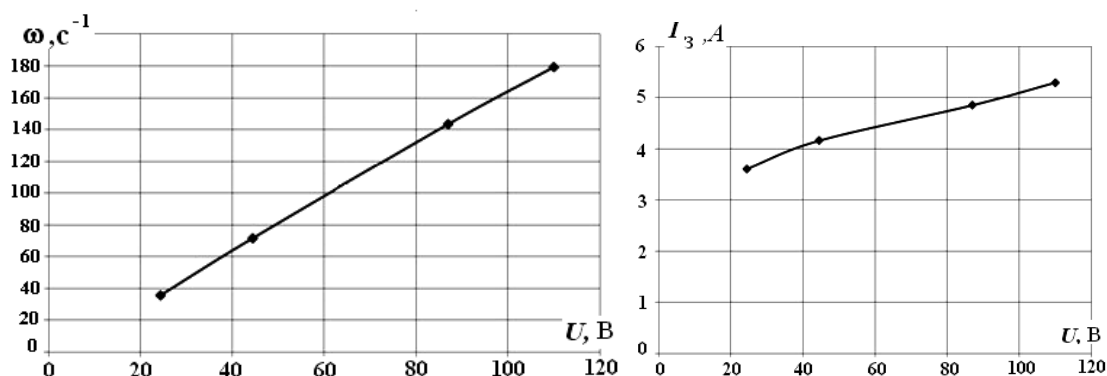


Рис. 12.14. Характеристики МПС при регулюванні вниз від номіналу

## 21. Розрахунок природних і штучних механічних характеристик

### Розрахунок природних характеристик

Характеристики розраховуються при сталому струмі збудження. Задавшись рядом значень струму  $(0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25)I_{ан}$  без додаткового опору у колі якоря, визначаємо ЕРС

$$E_{0.5} = U - 0,5 \cdot I_{ан} \cdot r_2 - \Delta U_{щ} = 110 - 0,5 \cdot 158,7 \cdot 0,0544 - 2 = 103,7 \text{ В.}$$

Орієнтовно реакцію якоря визначаємо за відношенням струму якоря до номінального

$$F_{qd\ 0.5} = F_{qdH} \cdot 0,5 = 251 \cdot 0,5 = 125,8 \text{ A}.$$

Аналогічно МРС послідовної обмотки при зміні струму якоря

$$F_{ст\ 0.5} = 0,5F_{ст\ H} = 0,5 \cdot 317,5 = 158,7 \text{ A}.$$

*Характеристики при ввімкненій стабілізуючій обмотці*

Сумарна МРС

$$F_{\Sigma\ 0.5} = F_{ш\ H} - F_{qd\ 0.5} + F_{ст} = 2220 - 125,8 + 158,7 = 2252 \text{ A}.$$

За розрахованою на ПК залежністю  $c\Phi = f(F_{\Sigma})$  визначаємо

$$c\Phi_{0.5} = 0,5583 \text{ Вб}.$$

Кутова швидкість

$$\omega_{0.5} = \frac{E_{0.5}}{c\Phi_{0.5}} = \frac{103,7}{0,5583} = 185,7 \text{ c}^{-1}.$$

Електромагнітний момент

$$M_{ем\ 0.5} = c\Phi_{0.5} \cdot I_a \cdot 0,5 = 0,5583 \cdot 158,7 \cdot 0,5 = 44,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок решти точок зведено до табл. 12.7.

Таблиця 12.7

Результати розрахунку природних механічних характеристик при ввімкненій стабілізуючій обмотці

$I^*$	0,25	0,5	1	1,25
$E_a, \text{В}$	105,8	103,7	99,4	97,2
$F_{ст}, \text{А}$	79	159	317,5	397
$F_{\Sigma}, \text{А}$	2236	2252	2285	2301
$c\Phi, \text{Вб}$	0,557	0,558	0,562	0,563
$\omega, \text{c}^{-1}$	190	185,7	177	173
$M_{ем}, \text{Н} \cdot \text{м}$	22	44	89	112

*Характеристики при вимкненій стабілізуючій обмотці*

Сумарна МРС

$$F_{\Sigma 0.5} = F_{\text{шн}} - F_{qd 0.5} = 2220 - 125,7 = 2094 \text{ A}.$$

За розрахованою на ЕОМ залежністю  $c\Phi = f(F_{\Sigma})$  визначаємо  $c\Phi_{0.5} = 0,541 \text{ Вб}$ .

Кутова швидкість залежно від ЕРС і потоку

$$\omega_{0.5} = \frac{E_{0.5}}{c\Phi_{0.5}} = \frac{103,9}{0,541} = 192 \text{ c}^{-1}.$$

Електромагнітний момент, що розвиває двигун,

$$M_{\text{ем} 0.5} = c\Phi_{0.5} \cdot I_a \cdot 0,5 = 0,541 \cdot 158,7 \cdot 0,5 = 43 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок решти точок зведено до табл. 12.8.

Таблиця 12.8

Результати розрахунку природних механічних характеристик при вимкненій стабілізуючій обмотці

$I^*$	0,25	0,5	1	1,25
$E_a, \text{В}$	105,9	103,9	99,9	97,8
$F_{\text{ст}}, \text{А}$	0	0	0	0
$F_{\Sigma}, \text{А}$	2157	2094	1968	1905
$c\Phi, \text{Вб}$	0,548	0,541	0,525	0,515
$\omega, \text{c}^{-1}$	193	192	191	190
$M_{\text{ем}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	22	44	89	112

#### Розрахунок штучних характеристик

При заданій швидкості  $n_{\text{шт}} = 0,5 \cdot n_{\text{н}} = 0,5 \cdot 1800 = 900 \text{ об} / \text{хв}$  кутова швидкість

$$\omega_{\text{шт}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{шт}}}{30} = \frac{\pi \cdot 900}{30} = 94,2 \text{ c}^{-1}.$$

Для забезпечення розрахованої швидкості при номінальному струмі необхідно ввести додатковий опір у коло якоря, величина якого

$$R_{\text{дод}} = \frac{U - \omega_{\text{шт}} \cdot c\Phi_{\text{н}}}{I_{\text{ан}}} - r_{2\Sigma} = \frac{110 - 94,2 \cdot 0,555}{158,7} - 0,0544 = 0,309 \text{ Ом}.$$

Для значень струму  $(0; 0,25; 0,5; 1; 1,25) I_{\text{ан}}$  при включеному додатковому опорі визначимо значення ЕРС

$$E_a = U_H - I_a (r_{2\Sigma} + R_{\text{дод}}) - \Delta U_{\text{щ}} = 110 - 79,36 (0,0544 + 0,309) - 2 = 79,2 \text{ В.}$$

Результати розрахунку зведено до табл. 12.9. Розраховані штучні та природні характеристики зображено на рис. 12.15.

Таблиця 12.9

Результати розрахунку штучних характеристик

$I^*$	0,25	0,5	1	1,25
$E_a, \text{В}$	93,6	79,2	50,3	35,9
$F_{\text{СТ}}, \text{А}$	79	159	318	397
$F_{\Sigma}, \text{А}$	2236	2252	2285	2301
$c\Phi, \text{Вб}$	0,557	0,558	0,562	0,563
$\omega, \text{с}^{-1}$	168	142	90	64
$M_{\text{ЕМ}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	22	44	89	112

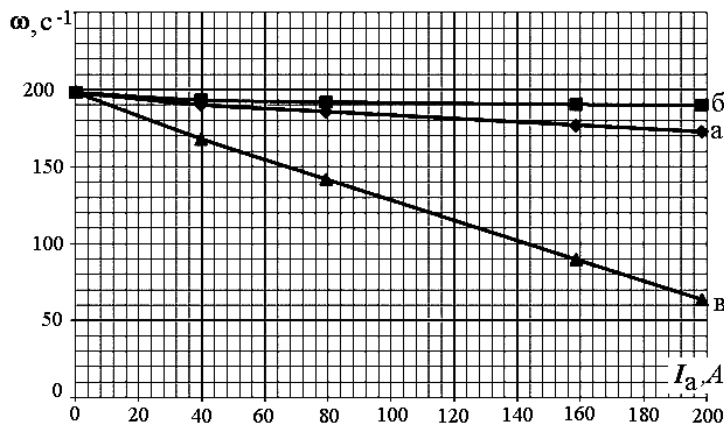


Рис. 12.15.  
Електромеханічні  
характеристики:  
а - природна;  
б - природна без  
стабілізуючої  
обмотки;  
в - штучна

## 22. Аналіз магнітного поля при перевантаженні

Приймаємо припустиме перевантаження  $k_r = 1,5$ .

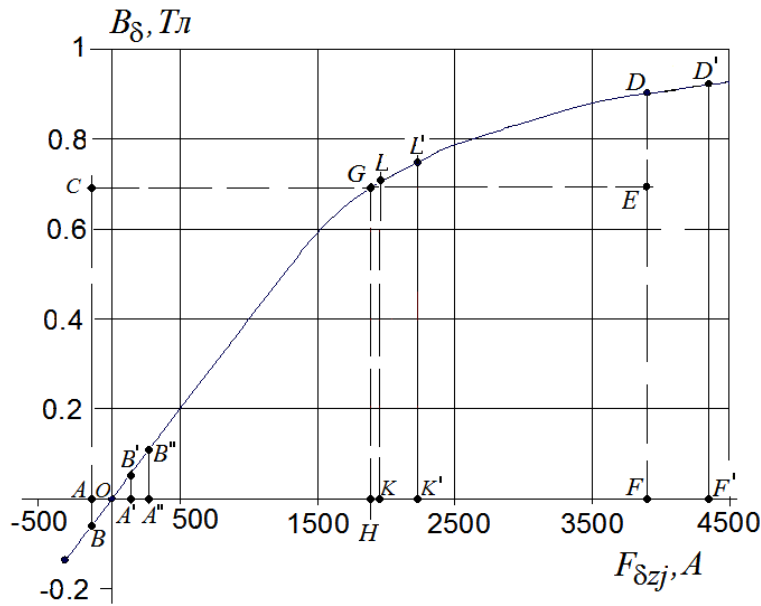


Рис. 12.16.  
До визначення  
 $F_{qd2}$

Індукція у повітряному зазорі (рис. 12.16)  $\overline{GH} = B_{\delta 0} = 0,69 \text{ Тл}$ .

МРС перехідного шару  $\overline{OH} = F_{12} = 1880 \text{ А}$ .

МРС на краю полюсної дуги  $\overline{AH} = \overline{HF} = F_{ap2} = 1,5 \cdot 1354 = 2030 \text{ А}$ .

З характеристики перехідного шару  $B_{\delta} = \varphi(B_{\delta zj})$  (рис. 12.16)

$$\overline{AB} = -0,06 \text{ Тл} \quad \overline{A'B'} = 0,06 \text{ Тл} \quad \overline{OA} = -150 \text{ А} \quad \overline{OA'} = 150 \text{ А}$$

$$\overline{A'B'} = B'_{\delta} = 0,06 \text{ Тл} \quad \overline{DF} = B''_{\delta} = 0,91 \text{ Тл} \quad \overline{KL} = B'''_{\delta} = 0,715 \text{ Тл}$$

Середнє значення індукції у повітряному повітрі

$$B_{\delta \text{ ср}} = \frac{1}{6} (0,06 + 0,91 + 4 \cdot 0,715) = 0,64 \text{ Тл}$$

Магнітний потік при перевантаженні

$$\Phi_2 = 0,64 \frac{1880}{2030} 92,3 \cdot 130 \cdot 10^{-6} = 0,00711 \text{ Вб}$$

Зменшення магнітного потоку

$$-\Delta\Phi = 0,00825 - 0,00711 = 0,00114 \text{ Вб}$$

МРС якоря

$$F_{qd2} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\overline{BC} - \overline{DE}}{\overline{BC} + \overline{DE}} \cdot A_2 \cdot b_p \cdot 10^{-3} = \frac{1}{6} \cdot \frac{0,54}{0,96} 43964 \cdot 92,4 \cdot 10^{-3} = 380 \text{ А}$$

За характеристикою  $B_{\delta} = \varphi(B_{\delta zj})$  з урахуванням  $F_{qd2}$  (рис.12.16)

$$\overline{OK'} = F'_{12} = 1880 + 380 = 2260 \text{ A}; \quad \overline{A''K'} = \overline{K'F'} = F_{ap2} = 2030 \text{ A}.$$

$$\overline{A''B''} = B'_{\delta} = 0,09 \text{ Тл} \quad \overline{D'F'} = B''_{\delta} = 0,92 \text{ Тл} \quad \overline{K'L'} = B'''_{\delta} = 0,755 \text{ Тл}.$$

Середнє значення індукції у повітряному повітрі

$$B'_{\delta \text{cp}} = \frac{1}{6}(0,09 + 0,92 + 4 \cdot 0,755) = 0,672 \text{ Тл}.$$

Магнітний потік при перевантаженні з урахуванням  $F_{qd2}$

$$\Phi'_2 = 0,672 \cdot 92,3 \cdot 130 \cdot 10^{-6} = 0,00806 \text{ Вб}.$$

Збільшення магнітного потоку при урахуванні  $F_{qd2}$

$$+\Delta\Phi = 0,00806 - 0,0071 = 0,00096 \text{ Вб}.$$

Оскільки  $-\Delta\Phi$  перевищує значення  $+\Delta\Phi$ , то остаточне значення МРС

$$F_{qd2} = 380 \frac{0,69}{0,672} = 390 \text{ A}.$$

## 23. Тепловий розрахунок

### Обмотка якоря

Перевищення температури поверхні осердя якоря над температурою повітря всередині машини

$$\theta_{\text{ста}} = \frac{\Delta p_{ea} \cdot (2 \cdot l_a / l_{\text{ва}}) + \Delta p_{\text{ст}}}{\alpha_2 \cdot l_a \cdot (\pi \cdot D_a)} = \frac{794 \cdot (2 \cdot 130 / 670) + 221,4}{9 \cdot 10^{-5} \cdot 130 \cdot (\pi \cdot 181)} = 79,6 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $\alpha_2 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C})$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні осердя якоря.

Периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження паза якоря

$$\Pi_2 = 2 \cdot (b_{\text{п}} + h_{\text{п}}) = 2 \cdot (10,65 + 21,4) = 69,5 \text{ мм}.$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки якоря

$$\Delta\theta_{\text{ізп}} = \frac{\Delta p_{ea} \cdot (2 \cdot l_a / l_{\text{ва}})}{z_1 \cdot \Pi_2 \cdot l_a} \cdot \frac{0,5 \cdot b_{\text{ік}}}{\lambda_{\text{екв}}} = \frac{794 \cdot (2 \cdot 130 / 670)}{21 \cdot 69,5 \cdot 130} \cdot \frac{0,5 \cdot 1,7}{16 \cdot 10^{-5}} = 8,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин ОЯ над температурою повітря усередині машини

$$\theta_{\text{іЗЛ}} = \frac{\Delta p_{\text{еа}} \cdot (2 \cdot l_{\text{Л}} / l_{\text{Ва}})}{2\pi \cdot D_{\text{а}} \cdot l_{\text{В}} \cdot \alpha_2} = \frac{794 \cdot (2 \cdot 205 / 670)}{2\pi \cdot 181 \cdot 67 \cdot 9 \cdot 10^{-5}} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перепад температур в ізоляції лобових частин обмотки

$$\Delta\theta_{\text{іЗЛ}} = \frac{\Delta p_{\text{еа}} \cdot (2 \cdot l_{\text{Л}} / l_{\text{Ва}})}{2z_1 \cdot \Pi_{\text{Л}} \cdot l_{\text{Л}}} \cdot \frac{0,5 \cdot b_{\text{іЛ}}}{\lambda_{\text{екв}}} = \frac{794 \cdot (2 \cdot 205 / 670)}{2 \cdot 21 \cdot 69,5 \cdot 205} \cdot \frac{0,5 \cdot 1}{16 \cdot 10^{-5}} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де  $\Pi_{\text{Л}} = \Pi_2 = 69,5 \text{ мм}$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження лобової частини одної котушки якоря;

$b_{\text{іЛ}} = 1 \text{ мм}$  – двостороння товщина ізоляції лобових частин обмотки якоря.

Середнє перевищення температури обмотки якоря над температурою всередині машини

$$\begin{aligned} \theta'_{\text{оа}} &= \frac{2 \cdot l_{\text{а}}}{l_{\text{Ва}}} \cdot (\theta_{\text{ста}} + \Delta\theta_{\text{іЗП}}) + \frac{2 \cdot l_{\text{Л}}}{l_{\text{Ва}}} \cdot (\theta_{\text{іЗЛ}} + \Delta\theta_{\text{іЗЛ}}) = \\ &= \frac{2 \cdot 130}{670} \cdot (79,6 + 8,6) + \frac{2 \cdot 205}{670} \cdot (70 + 2,5) = 75 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Середнє перевищення температури повітря усередині машини над температурою охолоджуючого середовища

$$\theta_{\text{В}} = \frac{\Sigma\Delta p'}{S_{\text{охл}} \cdot \alpha_{\text{В}}} = \frac{2937,5}{2,42 \cdot 10^5 \cdot 90 \cdot 10^{-5}} = 13,5 \text{ } ^\circ\text{C}.,$$

де  $\Sigma\Delta p' = \Sigma\Delta p - 0,1\Delta p_{\text{еЩ}} = 2937,5 \text{ Вт}$ ;

$$S_{\text{охл}} = \pi \cdot D_{\text{Н}} \cdot l_{\text{С}} = \pi \cdot 346 \cdot 222,4 = 2,42 \cdot 10^5 \text{ мм}^2;$$

$\alpha_{\text{В}} = 90$  – коефіцієнт, що враховує нагрівання повітря.

Середнє перевищення температури ОЯ над температурою охолоджуючого середовища

$$\theta_{\text{оа}} = \theta'_{\text{оа}} + \theta_{\text{В}} = 75 + 13,5 = 88,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### Обмотка збудження

Перевищення температури зовнішньої поверхні охолодження багат шарової котушки ОЗ над температурою охолоджуючого середовища



$$\theta_{\text{кз}} = 0,45 \frac{\Delta p_{\text{еш}}}{p \cdot S_{\text{кв}} \cdot \alpha_1} = 0,45 \frac{601,7}{2 \cdot 4,39 \cdot 10^4 \cdot 6 \cdot 10^{-5}} = 51,4^\circ \text{C}.$$

Умовна поверхня охолодження

$$S_{\text{кз}} = l_{\text{вш}} \cdot \Pi_{\text{кз}} = 438,9 \cdot 100 = 4,39 \cdot 10^4 \text{ мм}^2,$$

де  $\Pi_{\text{кз}} = 100 \text{ мм}$  – периметр поперечного перерізу умовної поверхні охолодження за ескізом міжполюсного вікна.

Перепад температури в ізоляції котушки

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{\text{ізз}} &= 0,45 \frac{\Delta p_{\text{ез}}}{p \cdot S_{\text{кз1}}} \cdot \left( \frac{b_{\text{кз}}}{8 \cdot \lambda'_{\text{екз}}} + \frac{b_{\text{ікз}}}{\lambda_{\text{екз}}} \right) = \\ &= 0,45 \frac{601,7}{2 \cdot 4,39 \cdot 10^4} \cdot \left( \frac{30}{8 \cdot 12 \cdot 10^{-4}} + \frac{0}{16 \cdot 10^{-5}} \right) = 9,6^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

де  $\lambda_{\text{екз}} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ \text{C})$ ;  $\lambda'_{\text{екз}} = 12 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ \text{C})$ .

Середнє перевищення температури ОЗ над температурою повітря усередині машини

$$\theta'_{\text{оз}} = \theta'_{\text{кз}} + \Delta \theta_{\text{ізз}} = 51,4 + 9,63 = 61^\circ \text{C}.$$

Середнє перевищення температури ОЗ над температурою охолоджуючого середовища

$$\theta_{\text{оз}} = \theta'_{\text{оз}} + \theta_{\text{в}} = 61 + 13,5 = 74,5^\circ \text{C}.$$

### *Обмотка додаткових полюсів (ОДП)*

Перевищення температури зовнішньої поверхні охолодження котушки ОДП над температурою повітря всередині машини

$$\theta_{\text{кд}} = 0,45 \frac{\Delta p_{\text{ед}}}{p \cdot S_{\text{кд}} \cdot \alpha'_1} = 0,45 \frac{495}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^4 \cdot 9 \cdot 10^{-5}} = 77,5^\circ \text{C}.$$

де умовна поверхня охолодження

$$S_{\text{кд}} = l_{\text{вд}} \cdot (w_{\text{кд}} \cdot a_{\text{прд}} + 0,6b_{\text{прд}}) = 384 \cdot (17 \cdot 1,81 + 0,6 \cdot 18) = 1,6 \cdot 10^4 \text{ мм}^2,$$

$\alpha'_1 = 9 \cdot 10^{-5}$  – середнє значення коефіцієнта тепловіддачі.

Середнє перевищення температури ОДП над температурою повітря усередині машини

$$\theta'_д = \theta_{кд} = 77,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури ОЗ над температурою охолоджуючого середовища

$$\theta_д = \theta'_д + \theta_в = 77,5 + 13,5 = 91 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### Колектор

Перевищення температури поверхні колектора над температурою повітря всередині машини

$$\theta'_к = \frac{\Delta p_{\text{ещ}} + \Delta p_{\text{тщ}}}{S_к \cdot \alpha_к} = \frac{318 + 181}{4,16 \cdot 10^4 \cdot 20 \cdot 10^{-5}} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}.,$$

де  $\alpha_к = 20 \cdot 10^{-5}$  – коефіцієнт тепловіддачі охолодження колектора;

$$S_к = \pi \cdot l_к \cdot D_к = \pi \cdot 106 \cdot 125 = 4,16 \cdot 10^4 \text{ мм}^2,$$

Середнє перевищення температури колектора над температурою охолоджуючого середовища

– при вході охолоджуючого повітря з боку колектора

$$\theta_{к1} = \theta'_к = 60 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– при вході охолоджуючого повітря з боку, зустрічного колектору,

$$\theta_{к2} = \theta'_к + \theta_в = 60 + 13,5 = 73,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Результати теплового розрахунку зведені у табл. 12.10.

\_Таблиця 12.10

### Порівняння перевищення температури

Елемент	Розрахункова, $^\circ\text{C}$	Припустима, $^\circ\text{C}$
Колектор	73,4	90
Обмотка додаткового полюса	91	100
Шунтова обмотка збудження	74,6	100
Обмотка якоря	53,5	110

## 24. Вентиляційний розрахунок

Витрата повітря, необхідна для охолодження

$$Q_{\text{пов}} = \frac{\Sigma \Delta p}{1100 \cdot \theta_в} = \frac{2998}{1100 \cdot 13,5} = 0.202 \text{ м}^3/\text{с}$$

Зовнішній діаметр вентилятора приймаємо

$$D_2 = 0,9 \cdot D_{\text{вс}} = 0,9 \cdot 311,6 = 280,4 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр вентилятора

$$D_{\text{вен1}} = 1,4 \cdot D_a = 1,4 \cdot 181 = 253,4 \text{ мм.}$$

Довжина лопатки вентилятора

$$b_{\text{ЛВ}} = 0,12 \cdot D_2 = 0,12 \cdot 280,4 = 33,7 \text{ мм.}$$

Число лопаток вентилятора

$$N_{\text{Л}} = 6 \frac{D_2}{D_2 - D_1} = 6 \frac{280,4}{280,4 - 253,4} = 62.$$

Лінійна швидкість по зовнішньому діаметру

$$g_{\text{в2}} = \frac{\pi D_2 \cdot n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,2804 \cdot 1800}{60} = 26,4 \text{ м/с.}$$

Лінійна швидкість по внутрішньому діаметру

$$g_{\text{в1}} = \frac{\pi D_1 \cdot n_{\text{н}}}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,2534 \cdot 1800}{60} = 23,9 \text{ м/с.}$$

Напір вентилятора при неробочому ході

$$H_0 = 0,6 \cdot (g_{\text{в2}}^2 - g_{\text{в1}}^2) = 0,6 \cdot (26,4^2 - 23,9^2) = 76,9 \text{ Па.}$$

Переріз вхідних отворів вентилятора

$$S_2 = 0,92 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot l_{\text{Л}} = 0,92 \cdot 3,14 \cdot 280,4 \cdot 33,7 = 2,7 \cdot 10^4 \text{ мм}^2.$$

Максимальна кількість повітря у вентиляторі

$$Q_{\text{в max}} = 0,42 \cdot g_{\text{в2}} \cdot S_2 \cdot 10^{-6} = 0,42 \cdot 26,4 \cdot 2,7 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6} = 0,3 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Середнє значення аеродинамічного опору  $Z = 1,4 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$ .

Дійсна витрата повітря

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{в max}} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + Z \cdot Q_{\text{в max}}^2}} = 0,3 \sqrt{\frac{76,9}{76,9 + 1,4 \cdot 0,3^2}} = 0,3 \text{ м}^3/\text{с.}$$

**Охолодження двигуна забезпечується, оскільки  $Q_{\text{в}} > Q_{\text{пов}}$ .**

## 25. Механічний розрахунок

### Розрахунок колектора

Довжина робочої поверхні колектора

$$l_0 = N_{\text{щб}} \cdot l_{\text{щ}} + 3(N_{\text{щб}} - 1) = 4 \cdot 16 + 3(4 - 1) = 73 \text{ мм}.$$

Приймаємо ширину технологічної виточки  $l_1 = 7 \text{ мм}$ , довжина петушка  $l_{\text{п}} = 15 \text{ мм}$ .

Ширина петушка колекторної пластини

$$l_2 = \frac{I_{\text{ан}}}{2a \cdot 2h_{\text{пр}} \cdot j_{\text{щ}}} = \frac{158,7}{2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 8,5 \cdot 0,31} = 15 \text{ мм}.$$

Повна довжина колектора

$$l_{\text{к}} = l_0 + l_1 + l_2 = 73 + 7 + 15 = 95 \text{ мм}.$$

Висота колекторної пластини

$$h_{\text{к}} = 9 \cdot \sqrt{0,1D_{\text{к}}} = 9 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 125} = 31,8 \text{ мм}.$$

Висота ластівчиного хвоста

$$h_1 = 0,5h_{\text{к}} = 0,5 \cdot 31,8 = 15,9 \text{ мм}.$$

Висота робочої частини пластини

$$h_2 = h_{\text{к}} - h_1 = 31,8 - 15,9 = 15,9 \text{ мм}.$$

Довжина середньої частини ластівчиного хвоста

$$l_4 = 1,4h_1 = 1,4 \cdot 15,9 = 22,3 \text{ мм}.$$

Довжина крайніх частини ластівчиного хвоста:

$$l_3 = 1,6h_1 = 1,6 \cdot 15,9 = 25,5 \text{ мм};$$

$$l_5 = 1,4h_1 = 1,4 \cdot 15,9 = 22,3 \text{ мм}.$$

Зусилля у небезпечному перерізі ластівчиного хвоста

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 135 \cdot 10^{-6} \cdot l_{\text{к}} \cdot \frac{h_{\text{к}}}{h_1} \cdot (D_{\text{к}} - h_{\text{к}}) \left( \frac{1,25n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 = \\ &= 135 \cdot 10^{-6} \cdot 95 \cdot \frac{31,8}{15,9} \cdot (125 - 31,8) \left( \frac{1,25 \cdot 4140}{1000} \right)^2 = 64 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

Зусилля у небезпечному перерізі колекторної пластини

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 150 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{l_4^2}{h_k - h_1 - \varepsilon} \cdot (D_k - h_k - h_1 - 2\varepsilon) \left( \frac{1,2n_{\max}}{1000} \right)^2 = \\ &= 150 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22,3^2}{31,8 - 15,9 - 10} \cdot (125 - 31,8 - 15,9 - 2 \cdot 10) \left( \frac{1,2 \cdot 4140}{1000} \right)^2 = 17,8 \frac{MH}{m^2}\end{aligned}$$

### *Розрахунок кріплення ОЯ бандажами*

Маса міді у лобовій частині ОЯ

$$g_{\text{Л}} = 1,15 N_a \cdot q_{\text{ПР}} \cdot \tau \cdot 8,9 \cdot 10^{-6} = 1,15 \cdot 210 \cdot 13,4 \cdot 142,2 \cdot 8,9 \cdot 10^{-6} = 4,1 \text{ кг.}$$

Тангенціальна сила в бандажі

$$\begin{aligned}T_{\text{Л}} &= 0,9 g_{\text{Л}} (D_a - h_{\text{П}}) \left( \frac{1,2n_{\max}}{1000} \right)^2 = \\ &= 0,9 \cdot 4,1 \cdot (181 - 24,1) \left( \frac{1,2 \cdot 4140}{1000} \right)^2 = 14145 \text{ Н.}\end{aligned}$$

Число витків стрічки лобової частини ОЯ

$$w_{\text{б.Л}} = \frac{T_{\text{П}}}{\sigma_{\text{Л}} \cdot q_{\text{Л}}} = \frac{14145}{125 \cdot 0,2 \cdot 20} = 28.$$

### *Розрахунок кріплення полюсів*

Сила, що зміщає, яка зумовлена дією електромагнітного моменту,

$$F = \frac{k \cdot M_{\text{Н}}}{p \cdot D_a} 10^3 = \frac{2 \cdot 89}{2 \cdot 181} 10^3 = 492 \text{ Н,}$$

де  $k = 2$  – коефіцієнт завантаження;  $M_{\text{Н}}$  – номінальний момент машини.

Маса головного полюса з обмоткою

$$\begin{aligned}m_{\text{ГП}} &= \left[ h_{\text{Г}} \cdot b_{\text{Г}} + h_{\text{ГН}} \cdot b_{\text{ГН}} + (b_{\text{Р}} - 0,5b_{\text{Г}}) \sqrt{h_{\text{ГН}}^2 + b_{\text{ГН}}^2} \right] \cdot l_{\text{Г}} \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} + \\ &+ (w_{\text{Ш}} \cdot l_{\text{В Ш}} \cdot q_{\text{Ш}} + q_{\text{С}} \cdot w_{\text{С}} \cdot l_{\text{В С}}) \cdot 8,9 \cdot 10^{-6} = 6 \text{ кг.}\end{aligned}$$

Площа поперечного перерізу болтів, що кріплять один полюс,

$$S_{\text{б}} = \frac{F + 9,81 \cdot m_{\text{ГП}}}{0,2 \cdot \sigma} = \frac{492 + 9,81 \cdot 6}{0,2 \cdot 160} = 17,3 \text{ мм}^2.$$

Прийmemo число болтів на один полюс  $N_{\text{б}} = 2$ .

Діаметр болта по внутрішньому діаметру різьби

$$d_{\text{б}} = 2 \sqrt{\frac{S_{\text{б}}}{N_{\text{б}}}} = 2 \sqrt{\frac{17,3}{2}} = 5,9 \text{ мм}.$$

Приймаємо діаметр болта  $d_{\text{б}} = 8 \text{ мм}$ .

Розрахунково-пояснювальна записка оформлюється згідно Додатку Ж.

## 13. ПІДГОТОВКА ДО ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ

### 13.1. Запитання до захисту проекту

Запитання до захисту курсового проекту можуть відноситися до таких тем:

- I. Обґрунтування вибору електромагнітних навантажень, головних розмірів машини, її конструктивного виконання; вплив цих даних на характеристики машини.
- II. Опис конструкції окремих деталей і вузлів спроектованої машини, їх призначення; фактори, які визначають їх розміри і конструкцію; опис функціональних систем машини.
- III. Методи електромагнітного, теплового і механічного розрахунків окремих елементів машини; метод вентиляційного розрахунку; припустимий рівень навантажень окремих елементів машини, результати розрахунків.
- IV. Обмотки якоря і полюсів, конструкція ізоляції, кріплення обмоток; схеми обмоток якоря; типи обмоток якоря в машинах різної потужності.
- V. Основи теорії машин постійного струму; принцип дії, основні рівняння, реакція якоря, питання комутації.
- VI. Експлуатація машин постійного струму; режими роботи, основні характеристики, методи пуску, способи регулювання частоти обертання.

Нижче як приклад наводяться деякі запитання, які можуть бути задані по кожній з тем при захисті проекту.

1. Які розміри машини називають головними і що визначає їх величину?
2. Назвіть види виконання машин за способом захисту від навколишнього середовища і дайте характеристику їх конструктивних особливостей.
3. Як охолоджується спроектована машина і чому обрана саме ця система вентиляції? Чи можливі інші варіанти?
4. Назвіть показники економічної ефективності спроектованого ДПС.
5. Як впливає зміна числа полюсів у машині на величину втрат у сталі якоря, на середню напругу між сусідніми колекторними пластинами, на величину потоку в повітряному зазорі при однаковій індукції?
6. Критерії вибору електромагнітних навантажень.
7. Порівняйте конструкцію головних і додаткових полюсів.
8. Опишіть конструкцію колектора спроектованої машини і пояс-

ність, які фактори визначають його розміри. Обґрунтуйте перевагу запропонованої в проекті конструкції перед іншими можливими варіантами.

9. Обґрунтуйте вибір конструкції магнітопроводу індуктора з компенсаційною обмоткою і без неї. Розгляньте можливі її варіанти.

10. Проаналізуйте ЕРС, які наводяться в секції ОЯ, що комутується.

11. Призначення ДП і розрахунок індукції в повітряному зазорі. Розрахунок МРС ДП і ОДП. Розрахунок зазору під ДП. Розрахунок ширини полюсного наконечника ДП.

12. Особливості розрахунку магнітного потоку розсіяння та потоку в осерді ДП.

13. Які фактори враховуються при виборі повітряного зазору під головним полюсом? Чи впливають на його величину наявність або відсутність компенсаційної обмотки, система збудження, діапазон регулювання частоти обертання?

14. Розрахунок величини повітряного зазору.

15. Вибір конфігурації повітряного зазору. Вплив конфігурації повітряного зазору на розподіл магнітного поля.

16. Що враховують складові коефіцієнта повітряного зазору?

17. Який рівень припустимої індукції в головних і додаткових полюсах?

18. Регульовальна здатність МПС.

19. Визначення найбільшої частоти обертання ДПС.

20. Які обмеження необхідно враховувати при визначенні максимальної частоти обертання ДПС?

21. Регулювання частоти обертання ДПС вниз від номінальної.

22. Розрахунок характеристик при регулюванні частоти обертання вверх і вниз від номінальної.

23. До яких наслідків призводить вплив поля якоря на основне магнітне поле МПС?

24. Обґрунтуйте вибір типу обмотки якоря в запроектованій машині. Чи можна застосувати інший тип ОЯ, на чому це відіб'ється?

25. Як розраховуються кроки петльової та хвильової ОЯ?

26. Призначення, конструкція, розрахунок компенсаційної обмотки.

27. Вплив компенсаційної обмотки на вибір повітряного зазору, на величину МРС додаткових полюсів.

28. Поясніть величину коефіцієнтів розсіяння додаткових полюсів у ДПС за наявності компенсаційної обмотки і без неї.

29. Як оцінити якість розрахунку додаткових полюсів?



30. Поясніть критерій сталої роботи МПС.

31. Як впливають на комутацію величина лінійного навантаження, частота обертання якоря, поле якоря?

32. Як зміниться комутація, якщо при складанні машини зменшити (збільшити) повітряний зазор під додатковими полюсами порівняно з розрахунковим значенням?

33. При роботі МПС не підключена ОДП. Як це відіб'ється на роботі МПС?

34. При роботі МПС ОДП помилково підключена в коло паралельної ОЗ. Як це відіб'ється на роботі МПС?

35. Як впливає поле якоря на поздовжнє поле машини? На яких характеристиках позначається цей вплив?

36. Порівняйте відносно величину пускових моментів у двигунах паралельного й послідовного збудження і поясніть причину розбіжності.

37. Порівняйте економічність можливих способів регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.

38. Як впливає стабілізуюча обмотка на характеристики двигунів?

39. Поясніть, яким чином регулюється частота обертання в ДПС паралельного, послідовного та змішаного збудження?

40. Урахування дії поля якоря при перевантаженні ДПС.

Крім того, питання можуть стосуватися аналізу результатів проектування.

### 13.2. Тести для самоконтролю

**Запитання 1.** Яким вибирається значення індукції й лінійного навантаження в ДПС з помірною частотою обертання без регулювання її вверх від номінальної.

Відповіді:

1. Знижене значення індукції та підвищене значення лінійного навантаження.
2. Підвищене значення індукції й лінійного навантаження.
3. Знижене значення індукції й лінійного навантаження.
4. Підвищене значення індукції й знижене значення лінійного навантаження.

**Запитання 2.** Яким вибирається значення індукції та лінійного навантаження у високошвидкісних ДПС з невеликим діапазоном регулювання частоти обертання вверх від номінальної?

Відповіді:

1. Знижене значення індукції й лінійного навантаження.
2. Підвищене значення індукції й лінійного навантаження.
3. Підвищене значення індукції й знижене значення лінійного наван-

таження.

4. Знижене значення індукції й підвищене значення лінійного навантаження.

**Запитання 3.** Яким вибирається значення індукції та лінійного навантаження в ДПС з широким діапазоном регулювання частоти обертання вверх від номінальної зменшенням магнітного потоку?

Відповіді:

1. Підвищене значення індукції й лінійного навантаження.
2. Підвищене значення індукції й знижене значення лінійного навантаження.
3. Знижене значення індукції й знижене значення лінійного навантаження.

**Запитання 4.** Як зміниться МРС збудження, якщо прийняти більше значення індукції в повітряному зазорі при збереженні геометрії машини?

Відповіді:

1. Не зміниться.
2. Збільшиться.
3. Зменшиться.

**Запитання 5.** Як зміниться конструктивний об'єм, якщо проектувати ЕМ на більшу частоту обертання при незмінній потужності машини й електромагнітних навантажень?

Відповіді:

1. Не зміниться.
2. Зменшиться.
3. Збільшиться.

**Запитання 6.** Як зміниться конструктивний об'єм ЕМ, якщо прийняти менше значення лінійного навантаження?

Відповіді:

1. Не зміниться.
2. Зменшиться.
3. Збільшиться.

**Запитання 7.** Як зміниться конструктивний об'єм ЕМ, якщо прийняти більше значення індукції у повітряному зазорі?

Відповіді:

1. Не зміниться.
2. Зменшиться.
3. Збільшить.

**Запитання 8.** Яке співвідношення густини струму під краями щітки відповідає уповільненій комутації?

Відповіді:

1.  $\frac{J_{щн}}{J_{щзб}} > 1$ ;
2.  $\frac{J_{щн}}{J_{щзб}} < 1$ ;
3.  $\frac{J_{щн}}{J_{щзб}} = 1$ .

**Запитання 9.** Яке співвідношення густини струму під краями щітки відповідає прискореній комутації?

Відповіді:

1.  $\frac{J_{щн}}{J_{щзб}} > 1$ ;
2.  $\frac{J_{щн}}{J_{щзб}} < 1$ ;
3.  $\frac{J_{щн}}{J_{щзб}} = 1$ .

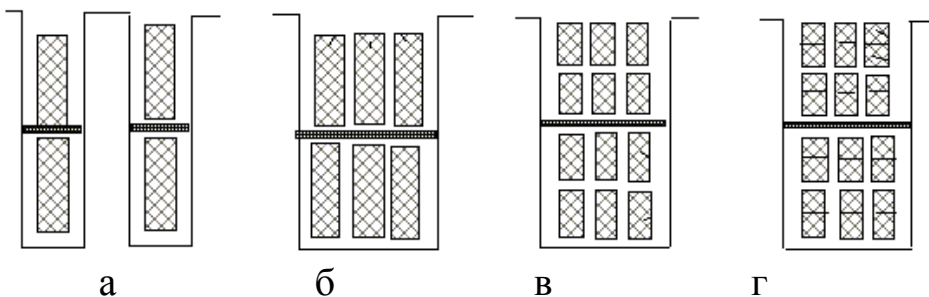
**Запитання 10.** Чому дорівнює частота перемагнічування сталі якоря ДПС при  $2p = 4$ ,  $n = 1500$  об / хв?

Відповіді:

1.  $f_{пер} = 100$  Гц.
2.  $f_{пер} = 75$  Гц.
3.  $f_{пер} = 50$  Гц.
4.  $f_{пер} = 25$  Гц.

**Запитання 11.** Яка структура паза рис. 13.1 відповідає

$$u_{II} = 3, w_c = 1, n_{ел} = 1?$$



Відповіді:

1. Рис. 13.1,а.
2. Рис. 13.1,б.
3. Рис. 13.1,в.
4. Рис. 13.1,г.

Рис. 13.1.

**Запитання 12.** Яка структура паза рис. 13.1 відповідає

$$u_{II} = 3, w_c = 2, n_{ел} = 1?$$

Відповіді:

1. Рис. 13.1,а.
2. Рис. 13.1,б.
3. Рис. 13.1,в.
4. Рис. 13.1,г.

**Запитання 13.** Яка структура паза рис. 13.1 відповідає

$$u_{II} = 3, w_c = 2, n_{ел} = 2?$$

Відповіді:

1. Рис. 13.1,а.
2. Рис. 13.1,б.
3. Рис. 13.1,в.
4. Рис. 13.1,г.

**Запитання 14.** Скільки ефективних провідників у пазу за рис. 13.1,г?

Відповіді:

1.  $N_{\Pi} = 4$ ;
2.  $N_{\Pi} = 6$ ;
3.  $N_{\Pi} = 24$ ;
4.  $N_{\Pi} = 12$ .

**Запитання 15.** Чому дорівнює припустиме значення середньої напруги між колекторними пластинами для ДПС без компенсаційної обмотки ?

Відповіді:

1.  $U_K = 22 \text{ В}$ .
2.  $U_K = 16 \text{ В}$ .
3.  $U_K = 5 \text{ В}$ .
4.  $U_K = 30 \text{ В}$ .
5.  $U_K = 25 \text{ В}$ .

**Запитання 16.** Чому дорівнює припустиме значення  $U_K$  для ДПС із компенсаційною обмоткою?

Відповіді:

1.  $U_K = 22 \text{ В}$ .
2.  $U_K = 16 \text{ В}$ .
3.  $U_K = 5 \text{ В}$ .
4.  $U_K = 30 \text{ В}$ .
5.  $U_K = 25 \text{ В}$ .

**Запитання 17.** Чому дорівнює припустиме значення струму паралельної гілки ОЯ?

Відповіді:

1.  $i_a = (100 \dots 150) \text{ А}$ .
2.  $i_a = (50 \dots 100) \text{ А}$ .
3.  $i_a = (250 \dots 350) \text{ А}$ .
4.  $i_a = (400 \dots 450) \text{ А}$ .

**Запитання 18.** У МПС з простою ХО  $Z_e = 35$ ,  $u_{\Pi} = 3$ ,  $N_{\Pi} = 18$ ,  $2p = 4$ .

Чому дорівнює скорочення кроку обмотки?

Відповіді:

1.  $\xi = 0$ .
2.  $\xi = 0,75$ .
3.  $\xi = 0,25$ .
4.  $\xi = 1$ .
5.  $\xi = 0,5$ .

**Запитання 19.** Яку конфігурацію має повітряний зазор у ДПС з КО?

Відповіді:

1. Ексцентричний.
2. Клиначастий.
3. Рівномірний.
4. Частково розбіжний.

**Запитання 20.** Чому орієнтовно дорівнює скіс частково розбіжного зазору?

Відповіді:

1. 10 % від довжини полюсної дуги.
2. 30 % від довжини полюсної дуги.
3. 70 % від довжини полюсної дуги.
4. Полюсній дузі.

**Запитання 21.** Чому дорівнює розрахункове (ефективне) значення повітряного зазору під головним полюсом?

Відповіді:

1. Зазору по осі полюса
2. Зазору на краю полюса.
3.  $(\delta_0 + \delta_{кр})/2$ .
4.  $0,75\delta_0 + 0,25\delta_{кр}$ .
5.  $0,75\delta_{кр} + 0,25\delta_0$ .

**Запитання 22.** Виходячи з якого співвідношення вибирається повітряний зазор у ДПС за наявності ДП і відсутності КО?

Відповіді:

1.  $\frac{F_{\delta_{zj}}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq 0,75$ .
2.  $\frac{F_{\delta_{zj}}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq 1$ .
3.  $\frac{F_{\delta_{zj}}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq 1,5$ .

**Запитання 23.** У ДПС збільшений повітряний зазор. Як це відіб'ється-

ся на МРС збудження машини?

Відповіді:

1. Не зміниться.
2. Збільшиться.
3. Зменшиться.

**Запитання 24.** Яким повинне бути значення коефіцієнта насичення магнітного кола ДПС?

Відповіді:

1.  $k_{\mu} = (0,8 \dots 0,95)$ .
2.  $k_{\mu} = (1 \dots 1,25)$ .
3.  $k_{\mu} = (1,4 \dots 1,8)$ .
4.  $k_{\mu} = (2,2 \dots 2,5)$ .
5.  $k_{\mu} = > 3$ .

**Запитання 25.** Яким повинне бути значення коефіцієнта повітряного зазору?

Відповіді:

1.  $(0,75 < k_{\delta} < 1)$ .
2.  $(1 < k_{\delta} < 1,5)$ .
3.  $(1,6 < k_{\delta} < 2)$ .

**Запитання 26.** Яка умова вибору зубцевого розподілу КО?

Відповіді:

1.  $0,9 < \frac{t_{\text{к}}}{t_1} < 1,1$ ;
2.  $\frac{t_{\text{к}}}{t_1} \neq (0,9 \div 1,1)$ ;
3.  $\frac{t_{\text{к}}}{t_1} = 1$ .

**Запитання 27.** Яким повинне бути значення лінійного навантаження КО?

Відповіді:

1.  $A_{\text{к}} = (0,25 \dots 0,5) A_{\text{а}}$ .
2.  $A_{\text{к}} = (0,85 \dots 1,15) A_{\text{а}}$ .
3.  $A_{\text{к}} = (0,5 \dots 0,75) A_{\text{а}}$ .

4.  $A_k = (1,25 \dots 1,5) A_a$ .

**Запитання 28.** Чому повинна дорівнювати МРС ДП?

Відповіді:

1. МРС поперечного поля якоря ( $F_{aq}$ ).
2. Подвоєному значенню МРС  $F_{aq}$ .
3. Орієнтовно  $(1,2 \dots 1,35)$  МРС  $F_{aq}$ .
4. Орієнтовно  $(0,75 \dots 1,0)$  МРС  $F_{aq}$ .

**Запитання 29.** Яким вибирається значення індукції в осерді додаткового полюса?

Відповіді:

1.  $B_{мд} = (1,4 \dots 1,6)$  Тл.
2.  $B_{мд} = (0,2 \dots 1,0)$  Тл.
3.  $B_{мд} = (0,25 \dots 0,5)$  Тл.

**Запитання 30.** Яким проводом виконується ОДП при перерізі проводника  $q_d < 10 \text{ мм}^2$ ?

Відповіді:

1. Круглим.
2. Прямокутним зі співвідношенням сторін.
3. Гола шинна мідь.

**Запитання 31.** Яким проводом виконується ОДП при перерізі проводника  $q_d > 35 \text{ мм}^2$ ?

Відповіді:

1. Круглим.
2. Прямокутним зі співвідношенням сторін.
3. Гола шинна мідь.

**Запитання 32.** Чому дорівнює коефіцієнт розсіяння ДП у ДПС без КО?

Відповіді:

1.  $\sigma_d = (1,15 \dots 1,25)$ .
2.  $\sigma_d = (2 \dots 2,5)$ .
3.  $\sigma_d = (3 \dots 4,5)$ .
4.  $\sigma_d = (0,75 \dots 1)$ .

**Запитання 33.** Чому дорівнює коефіцієнт розсіяння ГП у ДПС?

Відповіді:

1.  $\sigma_D = (1,15...1,25)$ .
2.  $\sigma_D = (2...2,5)$ .
3.  $\sigma_D = (3...4,5)$ .
4.  $\sigma_D = (0,75...1)$ .

**Запитання 34.** Скільки відсотків від вільної зони ДПС повинна становити ширина зони комутації?

Відповіді:

1.  $b_{зк} = (100...125) \%$ .
2.  $b_{зк} = (25...40) \%$ .
3.  $b_{зк} = (50...70) \%$ .

**Запитання 35.** Реактивна ЕРС у номінальному режимі роботи МПС становить 3,25 В. Чому дорівнює реактивна ЕРС при максимальній частоті обертання, якщо задана кратність регулювання 2,5?

Відповіді:

1.  $e_p = 3,25 \text{ В}$ .
2.  $e_p = 8,125 \text{ В}$ .
3.  $e_p = 1,3 \text{ В}$ .
4.  $e_p = 16,25 \text{ В}$ .

**Запитання 36.** Яка умова отримання під полюсом магнітного поля, що не перекидається?

Відповіді:

1.  $\frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} < 1$ .
2.  $\frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq 1$ .
3.  $\frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq (0,4...0,5)$ .

**Запитання 37.** Яка умова стійкої роботі ДПС при перекиданні магнітного поля під головним полюсом?

Відповіді:

1.  $\frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq 0,75$ .
2.  $\frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq 1$ .



$$3. \frac{F_{\delta zj}}{0,5 \cdot A \cdot b_p} \geq (0,4 \dots 0,5).$$

**Запитання 38.** Яким треба підтримувати значення моменту навантаження ДПС із самовентиляцією при регулюванні частоти обертання униз від номінальної?

Відповіді:

1. Незмінним.
2. Зменшувати.
3. Збільшувати.

Додаток А

### Характеристики намагнічування сталей

Таблиця А.1

Основна таблиця намагнічування  
Сталь 2013

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1,9	13000	13 600	14000	14 800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2,0	20700	22 600	24 400	26 300	28 100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67 000	74 000	81000	88 000	95000	102000	109000	116000	123000
2,2	130000	138 000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226 000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298800	306 000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Таблиця А.2

Основна таблиця намагнічування  
Сталь 2211 и 2312

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6800	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12800
1,8	13400	14000	14600	15200	15800	16400	17 000	17 600	18 200	18800
1,9	19400	20 000	21800	23 700	25700	27810	30000	32200	344000	36600
2,0	38000	41 000	43 200	45 400	47600	49800	52000	545000	57500	60500
2,1	65500	72 500	80 000	88 000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000

Таблиця А.3

Основна таблиця намагнічування  
Сталь 2411

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	85	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	9	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1120	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2080	2870	3180	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6210	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13100	13700	14300	14900
1,8	15600	16200	16800	17500	18300	19100	20000	20900	21900	22900
1,9	23900	25000	26200	27400	28700	30000	32000	36000	42000	50000
2,0	59000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	14900	158 000	167 000	176 000	18500	194 000	203 000	212 000	22100	230 000
2,3	0	333 800	347 000	356 000	0	374 000	383 000	392 000	0	410 000
2,4	32900	428 000	437 000	446 000	36500	464 000	473 000	482 000	401000	500 000

Таблиця А.4

Основна таблиця намагнічування  
Сталь 3411

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,0	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2800	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10000	11200	13000	15500	19000	22500	26000	30000	35000
2,0	4000	45000	50 000	55000	60000					

Таблиця А.5

Основна таблиця намагнічування  
Листова сталь СтЗ завтовшки 1–2 мм (для полюсів)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,5	250	—	—	—	—	275	—	—	—	—
0,6	295	—	—	—	—	320	—	—	—	—
0,7	345	—	—	—	—	375	—	—	—	—
0,8	405	—	—	—	—	440	—	—	—	—
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1,0	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	608	703	720	731	748	760	775	790	808	820
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1040
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1,6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10300	10800	11400
1,8	11900	12400	13000	13500	14100	14800	15600	16200	17000	17800
1,9	18800	19700	20700	21500	22600	23500	24000	25600	26500	27500
2,0	29000	30200	31500	28000	34200	36100	38000			

Таблиця А.6

Основна таблиця намагнічування  
Лита сталь СтЗ, товсті листи, поковки

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1,0	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1066	1073
1,1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	4700	4870	5000	5150	5300	5500

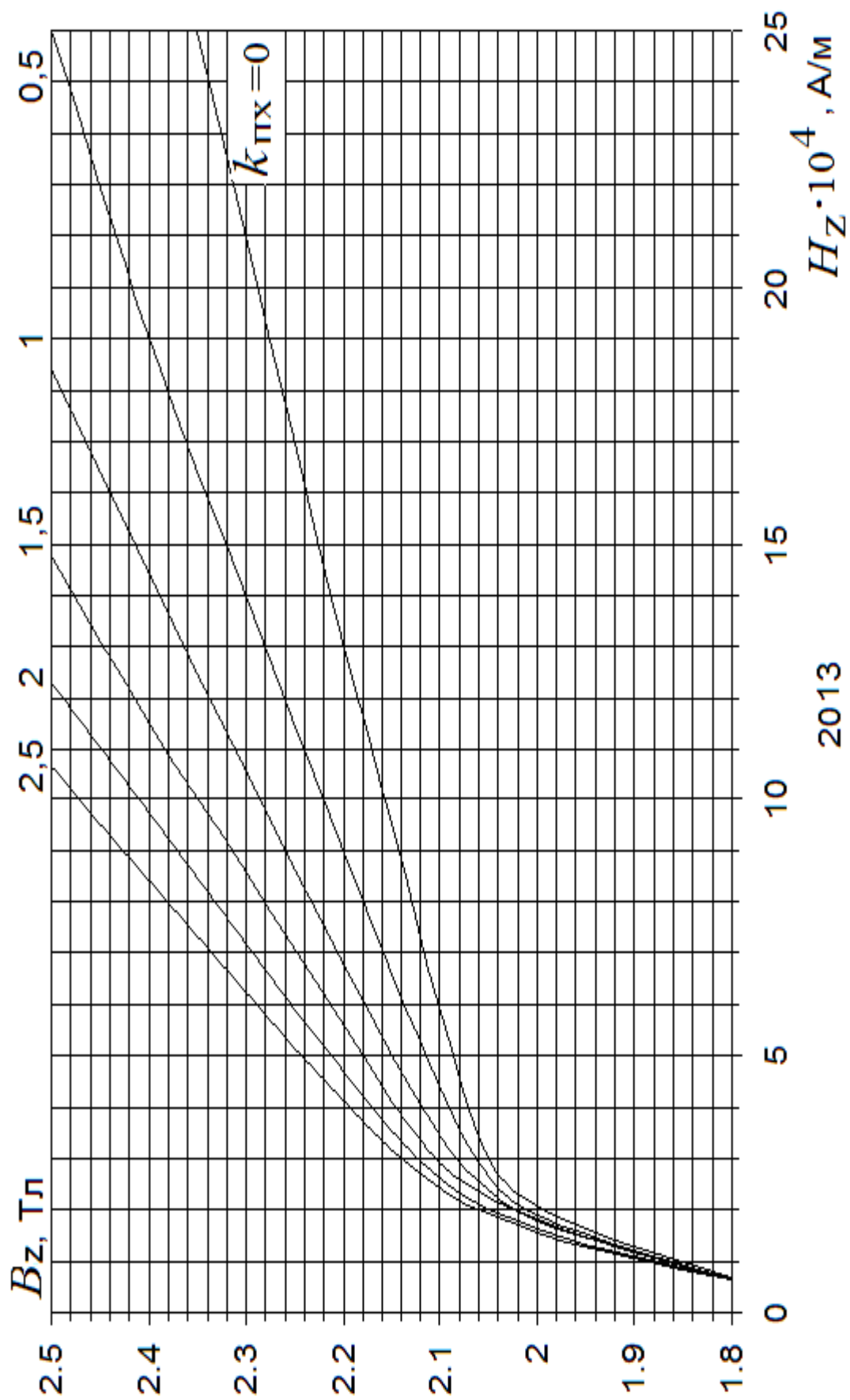


Рис. А.1. Характеристики намагнічування для зубців – сталь 2013

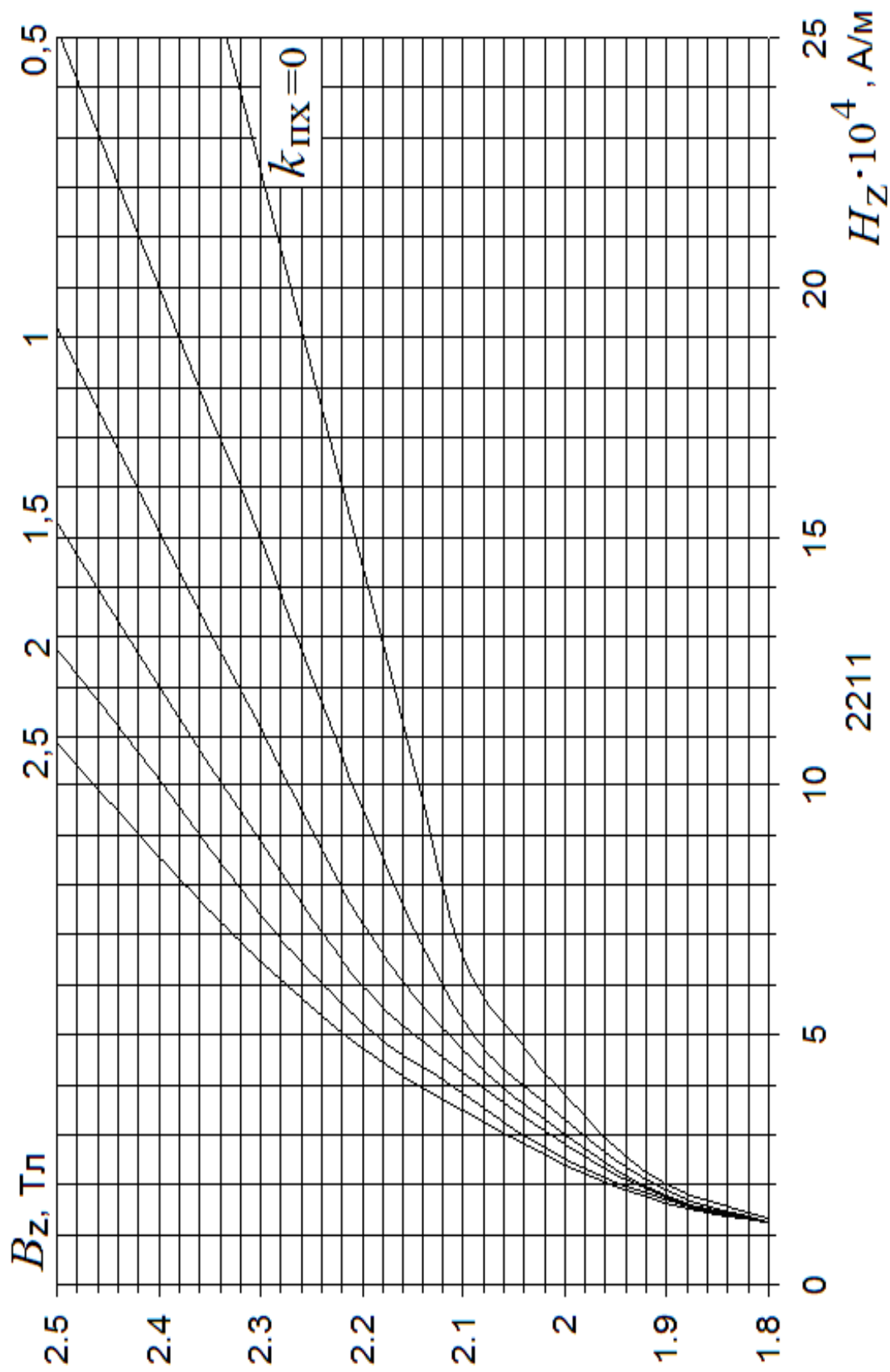


Рис. А.2. Характеристики намагнічування для зубців – сталь 2211, 2312

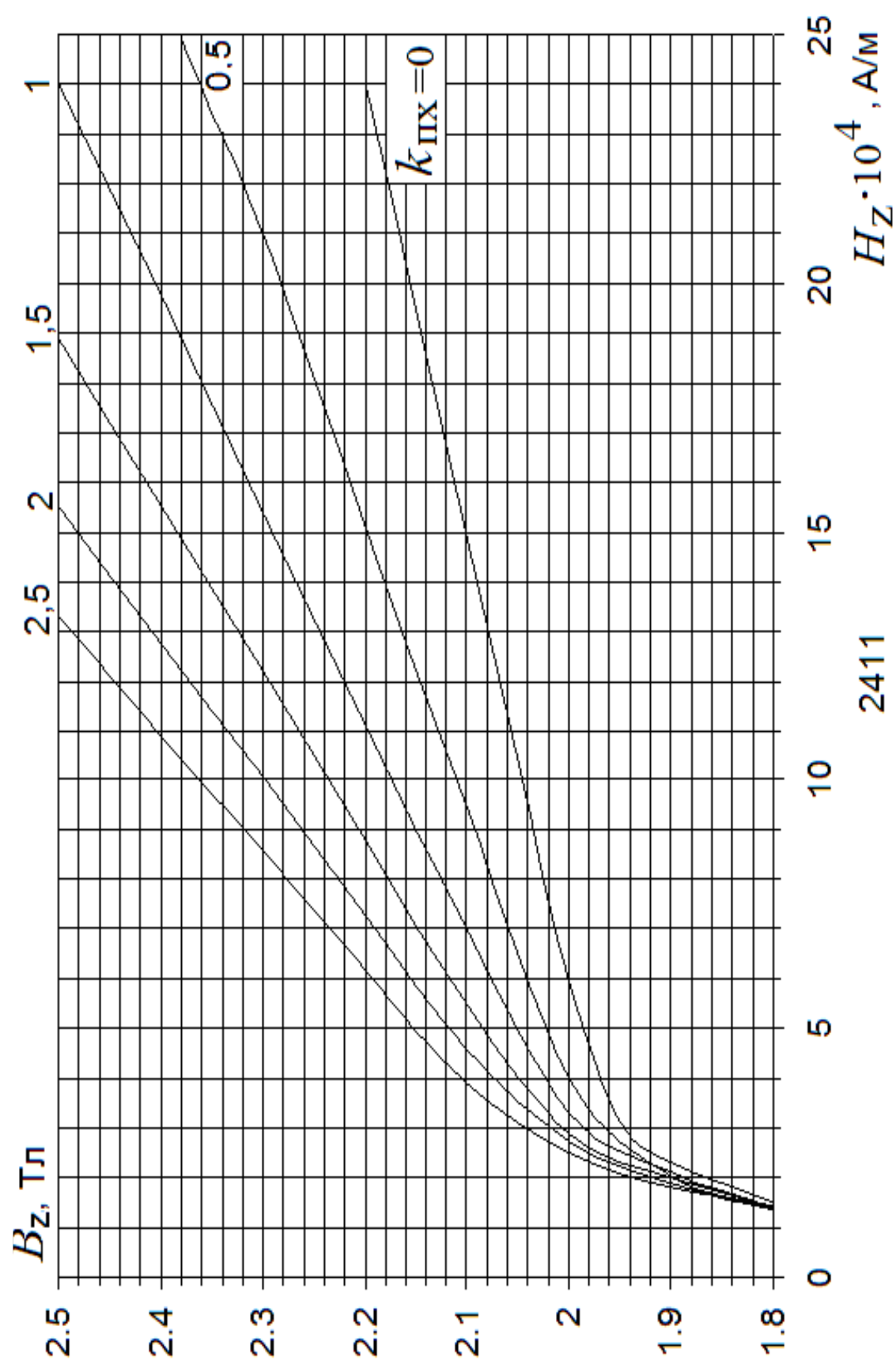


Рис. А.3. Характеристики намагнічування для зубців – сталь 2411



Розміри обмотувальних проводів круглого перерізу  
марок ПЕТВ и ПЕТ-155

Номиналь- ний діаметр неізолю- ваного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюва- ного проводу, мм	Площа по- перечного перерізу неізолюва- ного проводу, мм <sup>2</sup>	Номиналь- ний діаметр неізолю- ваного проводу, мм	Середнє значення діаметра ізолюва- ного проводу, мм	Площа по- перечного перерізу неізолю- ваного проводу, мм <sup>2</sup>
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
0,25	0,285	0,0491	1,25	1,33	1,227
(0,265)	0,3	0,0552	1,32	1,405	1,368
0,28	0,315	0,0616	1,40	1,485	1,539
(0,3)	0,335	0,0707	1,5	1,585	1,767
0,315	0,35	0,0779	1,6	1,685	2,011
0,335	0,37	0,0881	1,7	1,785	2,27
0,355	0,395	0,099	1,8	1,895	2,54
0,375	0,415	0,1104	1,9	1,995	2,83
0,4	0,44	0,1257	2	2,095	3,14
0,425	0,565	0,1419	2,12	2,22	3,53
0,45	0,49	0,159	2,24	2,34	3,94
(0,475)	0,515	0,1772	2,36	2,46	4,36
0,5	0,545	0,1963	2,5	2,6	4,91

Примітка. Проводи, що вказані в дужках, слід використовувати в окре-

мих випадках.

Додаток В

Розміри обмотувальних проводів прямокутного перерізу

Таблиця В.1

Розміри та площі поперечного перерізу прямокутної проволочки

Номінальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні								
	$a$ , мм								
	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,06	1,12	1,18	1,25
Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>									
2	1,46 3	1,54 5	1,62 6	1,70 6	1,78 5	1,90 5	2,02 5	2,14 5	2,28 5
2,12	1,55 9	—	1,73 4	—	1,90 5	—	2,16	—	2,43 5
2,24	1,65 5	1,74 9	1,84 2	1,93 4	2,02 5	2,16	1,29 4	2,42 9	2,58 5
2,5	1,86 3	1,97	2,07 6	2,18 1	2,28 5	2,43 5	2,58 5	2,73 6	2,91
2,65	1,98 3	—	2,21 1	—	2,43 5	—	2,75 3	—	3,09 8
2,8	2,10 3	2,22 5	2,34 6	2,46 6	2,58 5	2,75 3	2,92 1	3,08 9	3,28 5
3	2,26 3	—	2,52 6	—	2,78 5	—	3,14 5	—	3,53 5
3,15	2,38 3	2,52 2	2,66 1	2,79 9	2,93 5	3,12 4	3,31 3	3,50 2	3,72 3
3,35	2,54 3	—	2,84 1	—	3,13 5	—	3,53 7	—	3,97 3
3,55	2,70 3	2,86 2	3,02 1	3,17 9	3,33 5	3,54 8	3,76 1	3,97 4	4,22 3
3,75	2,86 3	—	3,20 1	—	3,53 5	—	3,98 5	—	4,47 3
4	3,06 3	3,24 5	3,42 6	3,60 6	3,78 5	4,02 5	4,26 5	4,50 5	4,78 5
4,25	3,26 3	—	3,55 1	—	4,03 5	—	4,54 5	—	5,09 8
4,5	3,46 3	3,67	3,87 6	4,08 1	4,28 5	4,55 5	4,82 5	5,09 5	5,41
4,75	3,66	—	4,10	—	4,53	—	5,10	—	5,72

	3		1		5		5		3
5	3,86 3	4,09 5	4,32 6	4,55 6	4,78 5	5,08 5	5,38 5	5,68 5	6,03 5
5,3	4,10 3	—	4,59 6	—	5,08 5	—	5,72 1	—	6,41
5,6	4,34 3	4,60 5	4,86 6	5,12 6	5,38 5	5,72 1	6,05 7	6,39 3	6,78 5
6	4,66 3	—	5,22 6	—	5,78 5	—	6,50 5	—	7,28 5
6,3	4,90	5,2	5,49 6	5,79 1	6,08 5	6,46 3	6,84 1	7,21 9	7,66
6,7	—	—	5,85 6	—	6,48 5	—	7,28 9	—	8,16
7,1	—	—	6,21 6	6,55 1	6,88 5	7,31 1	7,73 7	8,16 3	8,66
7,5	—	—	—	—	7,28 5	—	8,18 5	—	9,16
8	—	—	—	—	7,78 5	8,26 5	8,74 5	9,22 5	9,78 5
8,5	—	—	—	—	—	—	9,30 5	—	10,4 1
9	—	—	—	—	—	—	9,86 5	10,4 1	11,0 4
9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	11,6 6
10	—	—	—	—	—	—	—	—	12,2 9
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продовження таблиці В.1

.Номінальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні $a$ , мм								
	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
	Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>								
2	2,42 5	2,58 5	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	2,75 3	—	—	—	—	—	—	—

2,24	2,74 2	2,92 1	3,14 5	3,369	—	—	—	—	—
2,5	3,08 5	3,28 5	3,53 5	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	—	3,49 5	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,8	3,48 1	3,70 5	3,98 5	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3	—	3,98 5	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,15	3,94 3	4,19 5	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	—	4,47 5	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	4,47 1	4,75 5	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	—	5,03 5	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4	5,06 5	5,38 5	5,78 5	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	—	5,73 5	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
4,5	5,72 5	6,08 5	6,53 5	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	—	6,43 5	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5	6,38 5	6,78 5	7,28 5	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3	—	7,20 5	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,6	8,10 1	7,62 5	8,18 5	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6	—	8,18 5	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,3	9,10 1	8,60 5	9,23 5	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7	—	9,16 5	—	10,51	—	11,7	—	13,04	—
7,1	9,15 7	9,72 5	10,4 4	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5	—	10,2 9	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8	10,3	10,9	11,7	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6

	5	9	9						
8,5	—	11,6 9	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
9	11,6 7	12,3 9	13,2 9	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	—	13,0 9	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10	12,9 9	13,7 9	14,7 9	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	—	14,6 3	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	15,4 7	16,5 9	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—
12,5	—	—	—	19,7 9	20,8 9	22,1 4	23,3 9	24,6 4	26,1 4

Продовження таблиці В.1

Номінальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні $a$ , мм							
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35
	Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>							
2	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,69 3	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,14 1	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,58 9	7,82 9	8,32 6	—	—	—	—	—
3,75	8,03 7	—	8,82 6	—	—	—	—	—
4	8,89 7	8,89 1	9,45 1	10,6 5	10,8 5	—	—	—
4,25	9,15 7	—	10,0 8	—	11,3 5	—	—	—
4,5	9,71 7	10,0 7	10,7	11,3 8	12,0 5	12,9 5	13,6 3	—
4,75	10,2 8	—	11,3 3	—	12,7 5	—	14,4 1	—
5	10,8 4	11,2 5	11,9 5	12,7	13,4 5	14,4 5	15,2	16,2
5,3	11,5 1	—	12,7	—	14,2 9	—	16,1 5	—
5,6	12,1 8	12,6 7	13,4 5	14,2 9	15,1 3	16,2 5	17,0 9	18,2 1
6	13,0 8	—	14,4 5	—	16,2 5	—	18,3 5	—
6,3	13,7 5	14,3 2	15,2	16,1 5	17,0 9	18,3 5	19,3	20,5 6
6,7	14,6 5	—	16,2	—	18,2 1	—	20,5 6	—
7,1	15,5 4	16,2 1	17,2	18,2 7	19,3 3	20,7 5	21,8 2	23,2 4
7,5	16,4 4	—	18,2	—	20,4 5	—	23,0 8	—
8	17,5 6	18,3 3	19,4 5	20,6 5	21,8 5	23,4 5	24,6 5	26,2 5

8,5	18,6 8	—	20,7	—	23,2 5	—	26,2 3	—
9	19,8	20,6 9	21,9 5	23,3	24,6 5	26,5 4	27,8	29,6
9,5	20,9 2	—	23,2	—	26,0 5	—	29,3 8	—
10	22,0 4	23,0 5	25,4 5	25,9 5	27,4 5	29,4 5	30,9 5	32,9 5
10,6	23,3 8	—	25,9 5	—	29,1 3	—	32,8 4	—
11,2	24,7 3	25,8 8	27,4 5	29,1 3	30,8 1	33,0 5	34,7 3	36,9 7
11,8	26,0 7	—	28,9 5	—	32,4 9	—	36,6 2	—
12,5	27,6 4	24,9 5	30,7	32,5 8	34,4 5	36,9 5	38,8 3	41,3 3

Продовження таблиці В.1

Номінальний розмір проволоки по більшій стороні <i>b</i> , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні								
	<i>a</i> , мм								
	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>									
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—
5,3	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,6	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,3	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,7	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,1	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,5	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,5	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9	31,4	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,5	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,5
11,2	39,21	41,14	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
11,8	41,24	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14



## Продовження таблиці В.1

Номінальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , мм	Номінальний розмір проволочки по меншій стороні $a$ , мм					
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,8
	Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>					
10,8	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—
11,6	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—
12,5	—	41,35	—	43,83	46,02	—
13,2	—	—	—	46,31	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—
14	—	46,35	—	49,15	51,95	—
14,5	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	52,7	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—
16	—	53,05	—	56,25	59,14	—
16,8	54,62	—	58,82	—	—	63,36
18	58,56	—	63,06	—	—	67,92
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62
20	—	—	—	—	—	—
22	71,68	—	77,18	—	—	83,12
25	81,52	—	87,77	—	—	94,52
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46
28	—	—	—	—	—	105,92
30	—	—	—	—	—	113,52
32	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—

## Продовження таблиці В.1

Номинальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , мм	Номинальний розмір проволочки по меншій стороні $a$ , мм						
	4	4,1	4,25	4,4	4,5	4,7	4,75
	Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>						
10,8	—	—	—	—	—	—	—
11,2	43,94	—	46,7 4	—	49,5 4	—	52,3 4
11,6	—	—	—	—	—	—	—
11,8	46,34	—	—	—	52,2 4	—	—
12,5	49,14	—	52,2 7	—	55,3 9	—	58,5 2
13,2	51,94	—	—	—	58,5 4	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—
14	55,14	—	58,6 4	—	62,1 4	—	66,6 4
14,5	—	—	—	—	—	—	—
15	59,14	—	—	—	66,6 4	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—
16	63,14	—	67,1 4	—	71,1 4	—	75,1 4
16,8	—	68,02	—	73,06	—	78,1	—
18	—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
19,5	—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
20	79,52	—	—	—	—	—	—
22	—	89,34	—	95,94	—	102,5 4	—
25	99,52	101,6 4	—	109,1 4	—	116,4	—
26,3	—	106,9 7	—	114,8 6	—	122,7 5	—
28	111,9 4	113,9 4	—	122,3 4	—	130,7 4	—
30	119,5 2	122,1 4	—	131,1 4	—	140,1 4	—
32	—	130,3 4	—	139,9 4	—	149,5 4	—
35	—	—	—	153,1 4	—	163,6 4	—

Продовження таблиці В.1

Номинальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , <i>мм</i>	Номинальний розмір проволочки по меншій стороні $a$ , <i>мм</i>						
	5	5,1	5,3	5,5	5,6	6	6,5
	Розрахунковий переріз проволочки, $мм^2$						
10,8	—	—	—	—	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—	—
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—
14	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39
15	74,14	—	—	—	83,14	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54
16	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,34
18	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89
20	99,14	—	—	—	—	119,14	—
22	—	111,34	—	120,14	—	131,14	142,14
25	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94	170,09
28	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14
30	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—
32	—	162,34	—	175,14	—	—	—

## Закінчення таблиці В.1

Номинальний розмір проволочки по більшій стороні $b$ , мм	Номинальний розмір проволочки по меншій стороні $a$ , мм					
	7	8	9	10	11	12,5
	Розрахунковий переріз проволочки, мм <sup>2</sup>					
10,8	—	—	96,34	—	—	—
11,2	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	103,6 4	—	—	—
11,8	—	—	—	—	—	—
12,5	—	99,14	111,6 4	124,1 4	136,6 6	155,4 1
13,2	—	—	—	—	—	—
13,5	93,64	107,1 4	120,6 4	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—
14,5	100,6 4	115,1 4	129,6 4	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—
15,6	108,3 4	123,9 4	139,5 4	154,1 4	—	—
16	—	127,1 4	—	—	—	—
16,8	116,7 4	133,5 4	—	—	—	—
18	125,1 4	143,1 4	—	—	—	—
19,5	135,6 4	155,1 4	—	—	—	—
20	—	159,1 4	—	—	—	—
22	153,1 4	—	—	—	—	—
25	174,1 4	—	—	—	—	—
26,3	183,2 4	—	—	—	—	—
28	195,1 4	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	—	—

Таблиця В.2

## Максимальна товщина ізоляції обмотувальних проводів

Марка проводу	Двостороння товщина ізоляції							
	при діаметрах голого проводу $d$ , мм							
	0,05 – 0,09	0,1 – 0,19	0,2 – 0,25	0,26 – 0,3	0,32 – 0,36	0,37 – 0,5	0,53 – 0,71	0,75 – 0,95
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
АПБД	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18
ПЕЛШО, ПЕЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,1	0,105	0,11	0,115	0,125
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,2
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14	0,16	0,16

Закінчення таблиці В.2

Марка проводу	Двостороння товщина ізоляції							
	при діаметрах голого проводу $d$ , мм					прямокутного пров- ду при меншій сторо- ні перерізу голого проводу, мм		
	1 – 1,4	1,5 – 1,6	1,7 – 2,12	2,24 – 5	5 – 5,2	0,85 – 1,9	2,12 – 3,75	4 – 5,6
ПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЕЛБО	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
ПЕЛШО, ПЕЛШКО	0,135	0,15 5	0,15 5	—	—	—	—	—
ПСД, ПСДК	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,4
ПСДТ	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
ПСДКТ	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
ПДА	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4
ПЕВП, ПЕМП, ПЕВППИ, ПЕТВП	—	—	—	—	—	0,1— 0,12	0,15	—
ПШТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	0,45	0,45	0,5

## Розміри голої шинної міді

Таблиця Г.1

Номінальні розміри (мм) и розрахункові перерізи (мм<sup>2</sup>) шин

<i>b</i>	<i>a</i>							
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6
8	0,8	1,2	1,6	2	2,4	3,2	4	4,8
8,6	—	—	—	—	—	—	4,3	5,16
9,3	—	—	—	—	—	—	4,65	5,58
10	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
10,8	—	—	—	—	—	—	5,4	6,48
11,6	—	—	—	—	—	—	5,8	6,96
12,5	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	5	6,25	7,5
13,5	—	—	—	—	—	—	6,75	8,1
14	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,6	7	8,4
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—
16	1,6	2,4	3,2	4	4,8	6,4	8	9,6
16,8	—	—	—	—	—	—	8,4	10,1
18	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	7,2	9	10,8
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—
20	2	3	4	5	6	8	10	12
22	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	8,8	11	13,2
25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	10	12,5	15
26,3	—	—	—	—	—	—	13,2	15,8
28	2,8	4,2	5,6	7	8,4	11,2	14	16,8
30	3	4,5	6	7,5	9	12	15	18
32	3,2	4,8	6,4	8	9,6	12,8	16	19,2
35	3,5	5,25	—	—	10,5	—	17,5	—
40	4	6	8	10	12	16	20	24
45	—	6,75	—	—	13,5	—	22,5	—
50	5	7,5	10	12,5	15	20	25	30
55	—	—	—	—	16,5	—	27,5	—
60	6	9	12	15	18	24	30	36
65	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	—	14	—	21	28	35,3	42
75	—	—	—	—	22,5	30	37,5	45
80	—	—	16	—	24	32	40	48
90	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	—	20	—	—	—	50	—

Продовження таблиці Г.1

<i>b</i>	<i>a</i>							
	0,7	0,8	0,9	1	1,08	1,16	1,25	1,35
8	5,6	6,4	7,2	—	—	—	—	—
8,6	6,02	6,88	7,74	—	—	—	—	—
9,3	6,51	7,44	8,37	9,08	—	—	—	—
10	7	8	9	9,78	10,6	—	—	—
10,8	7,56	8,64	9,72	10,6	11,4	12,2	—	—
11,6	8,12	9,28	10,4	11,4	12,3	13,2	14,2	—
12,5	8,75	10	11,3	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5
13,5	9,45	10,8	12,2	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8
14	9,8	11,2	12,6	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2
15,6	—	—	—	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7
16	11,2	12,8	14,4	—	—	—	—	—
16,8	11,8	13,4	15,1	16,6	17,9	19,2	20,7	22,3
18	12,6	14,4	16,2	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9
19,5	—	—	—	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9
20	14	16	18	—	—	—	—	—
22	15,4	17,6	19,8	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3
25	17,5	20	22,5	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4
26,3	18,4	21	23,7	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1
28	19,6	22,4	25,2	27,8	30	32,2	34,7	37,4
30	21	24	27	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1
32	22,4	25,6	28,8	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8
35	24,5	28,8	—	34,8	37,6	40,3	43,4	46,9
40	28	32	36	39,8	43	46,1	49,7	53,6
45	31,5	36	—	44,8	—	—	55,9	60,4
50	35	40	45	49,8	53,8	57,7	62,2	67,1
55	38,5	44	—	54,8	—	—	—	—
60	42	48	54	59,8	—	—	—	—
65	45,5	—	—	64,8	—	—	—	—
70	—	56	63	69,8	—	—	—	—
75	52,5	60	67,5	74,8	—	—	—	—
80	—	64	72	79,8	—	—	—	—
90	—	72	—	—	—	—	—	—
100	—	80	—	99,8	—	—	—	—

Продовження таблиці Г.1

<i>b</i>	<i>a</i>							
	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2	2,1
8	—	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	19,1	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—
15,6	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—
16	—	23,5	—	—	—	—	—	—
16,8	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—
18	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—
19,5	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40
20	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—
22	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3
25	35,8	37	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6
26,3	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3
28	40,2	—	43,2	46,4	50	53,8	—	57,9
30	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1
32	46	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3
35	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6
40	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1
45	64,8	—	69,7	75	80,8	86,9	—	93,6
50	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1
55	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6
60	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1
65	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—
70	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—
90	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—
100	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—



## Продовження таблиці Г.1

<i>b</i>	<i>a</i>							
	2,26	2,44	2,5	2,63	2,83	3	3,28	3,53
8	—	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—
22	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
25	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	58,3	62,8	—	67,7	72,2	—	—	—
28	62,2	67	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	91,1	—
32	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35	78	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,6	120,9
40	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45	100, 6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47	—	113,4	—	—	—	—	—	—
50	111, 9	120,7	123,7	130	139,8	148,1	161,7	173,8
55	123, 2	132,9	—	142,2	154	163,1	178,1	191,5
60	134, 5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
75	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Продовження таблиці Г.1

<i>b</i>	<i>a</i>								
	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9
25	—	—	—	—	—	—	—	199, 1	224, 1
30	—	—	—	—	179, 1	194, 1	209, 1	239, 1	269, 1
32	—	—	—	—	191, 1	207, 1	—	—	—
35	—	—	174, 1	191, 6	209, 1	226, 6	—	279, 1	—
40	159, 5	179, 1	199, 1	219, 1	239, 1	259, 1	279, 1	319, 1	359, 1
45	179, 5	201, 6	224, 1	246, 6	269, 1	291, 6	314, 1	359, 1	404, 1
50	199, 5	224, 1	249, 1	274, 1	299, 1	324, 1	349, 1	399, 1	449, 1
55	219, 5	246, 6	274, 1	301, 1	329, 1	256, 6	384, 1	429, 1	494, 1
60	239, 5	269, 1	299, 1	329, 1	359, 1	389, 1	439, 1	479, 1	539, 1
65	259, 5	291, 6	324, 1	—	389, 1	—	454, 1	—	584, 1
70	279, 5	314, 1	349, 1	—	—	—	—	559, 1	629, 1
75	—	—	—	—	—	—	—	599, 1	—
80	319, 5	359, 1	399, 1	—	479, 1	—	559, 1	639, 1	—
90	359, 5	404, 1	449, 1	—	539, 1	—	629, 1	719, 1	—
100	399, 5	449, 1	499, 1	—	599, 1	—	699, 1	799, 1	—
120	—	—	—	—	—	—	—	959, 1	—

Закінчення таблиці Г.1

<i>b</i>	<i>a</i>								
	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	—	175, 1	199,1	233, 1	255,1	—	—	—	—

20	199,1	219, 1	249,1	279, 1	319,1	259, 1	399,1	—	—
25	249,1	274, 1	311,6	349, 1	399,1	449, 1	499,1	624, 1	—
30	299,1	329, 1	374,1	419, 1	479,1	539, 1	599,1	749, 1	899,1
35	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
40	399,1	439, 1	499,1	559, 1	639,1	719, 1	799,1	999, 1	1199, 1
45	449,1	494, 1	561,6	629, 1	719,1	809, 1	899,1	—	1349, 1
50	499,1	549, 1	624,1	699, 1	799,1	899, 1	999,1	—	—
55	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099, 1	—	—
60	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199, 1	—	—
65	649,1	—	811,6	—	1039, 1	—	—	—	—
70	699,1	—	874,1	—	1119, 1	—	—	—	—
80	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
90	899,1	—	1124, 1	—	—	—	—	—	—
100	999,1	—	1249, 1	—	—	—	—	—	—
120	1199, 1	—	—	—	—	—	—	—	—

Додаток Д

## Застосування ПЕОМ при проектуванні МПС

### Д.1. Етапи виконання розрахунків ДПС на ПК

Розрахунок МПС на ПЕОМ складається з чотирьох етапів роботи:

1 – попередні розрахунки:

- розрахунок геометрії магнітного кола;
- розрахунок складових коефіцієнта повітряного зазору;
- розрахунок індукцій;
- розрахунки характеристики неробочого ходу;

- розрахунки додаткового полюса;
- 2 – остаточний розрахунок:
- розрахунок втрат;
- 3 – розрахунок двигуна при  $\omega_{\max}$  ;
- 4 – проектні дослідження запроектованого двигуна.

На двох етапах розрахунків здійснюється контроль певного набору показників, розрахованих вручну.

**Протокол № 1**

Контрольовані показники –  $k_{\text{зап}}$ ;  $t_{\text{к}}$ , с;  $U_{\text{к}}$ , В;  $U_{\text{кmax}}$ , В.

**Протокол № 2**

Контрольовані показники –  $\Phi_1$ , Вб;  $B_{\delta}$ , Тл;  $B_{z1m}$ , Тл;  $B_j$ , Тл;  $B_{\Pi}$ , Тл;  $B_c$ , Тл.

**Протокол № 3**

Контрольовані показники –  $k_{\delta 1}(z)$ ;  $k_{\delta 2}$  (вент);  $k_{\delta 3}$  (банд);  $k_{\delta 4}$  (КО),  $k_{\delta}$ .

**Протокол № 4**

Контрольовані показники –  $k_{\mu}$ ;  $F_{\text{сум}}$ , А;  $F_{\delta zj}$ , А;  $A * b_p / 2$ , А;  $F_{\text{аqm}}$ , А.

**Протокол № 5**

Контрольовані показники –  $E_{\Gamma}$ , В;  $B_{\text{к}}$ , Тл;  $b_{\text{кз}}$ , см;  $b_{\text{кз}} / (\tau - b_p)$ ;  $F_{\text{в}}$ , А.

**Протокол № 6**

Контрольовані показники –  $\Delta p_{\text{са}}$ , Вт;  $\Delta p_{\text{сз}}$ , Вт;  $\Delta p_{\text{еа}}$ , Вт;  $\Delta p_{\text{еш}}$ , Вт;  $\Delta p_{\text{сум}}$ , Вт; ККД, %.

Етап розрахунків вважається виконаним, якщо помилка машинного й ручного розрахунків показників не перевищує заданої величини.

У процесі розрахунку на екран виводяться значення похибок по кожному контрольованому показнику (рис. Д.1).

## Контроль ручного расчета

Введите рассчитанные вручную значения следующих величин

	Кб1	Кб2	Кб3	Кб4	Кб	
Ручной расчет	1	1	1	1	1	1-й ввод
Погрешность, %	17	0	0	0	17	
Вы можете повторить ввод результатов ручного расчета						
Повторный ввод результатов ручного расчета						
Ручной расчет	1.201	1	1	1	1.201	2-й ввод
Погрешность, %	0	0	0	0	0	
Ручной расчет выполнен корректно						
Help	Расчет погрешности	Выход	Оценка	20		

Рис. Д.1. Вікно контролю показників

У випадку невиконання умов контролю необхідно скорегувати ручний розрахунок (відзначивши в протоколі скорегований показник) і виконати розрахунки етапу заново. Результати розрахунків на кожному етапі заносяться до протоколу.

Протоколи роботи наводяться в розрахунково-пояснювальній записці.

## Д.2. Вхідні дані до розрахунків на ПК

### Ознаки

IPR – ознака форми паза якоря;

JPI – ознака класу ізоляції машини;

JPR – ознака способу збудження;

JPB – ознака способу кріплення обмотки в пазах якоря;

JPC – ознака сорту сталі;

JPK – ознака наявності компенсаційної обмотки.

### Вхідні дані

$P_H$  – номінальна потужність, кВт;

$U_H$  – номінальна напруга, В;

$n_H$  – номінальна частота обертання, об/хв;

$F_C^*$  – відношення МРС  $F_C / F_{III}$ ;

$H$  – висота осі обертання, мм;

ККД – номінальний ККД (попереднє значення), в. о.;

$K_B$  – коефіцієнт  $K_B = I_3 / I_H$ ;

$K_e$  – коефіцієнт  $K_e = E_H / U_H$ ;  
 $\alpha_\delta$  – розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги;  
 $D_H$  – зовнішній діаметр станини, см;  
 $D_{BC}$  – внутрішній діаметр станини, см;  
 $D_a$  – зовнішній діаметр якоря, см;  
 $d_0$  – внутрішній діаметр якоря (діаметр вала), см;  
 $L_\delta$  – розрахункова довжина якоря, см;  
 $N_{kr}$  – число радіальних вентиляційних каналів;  
 $N_{ka}$  – число рядів аксіальних вентиляційних каналів;  
 $D_{ka}$  – діаметр аксіального вентиляційного каналу, см;  
 $L_c$  – довжина станини, см;  
 $L_M$  – довжина основного полюса, см;  
 $B_M$  – ширина основного полюса, см;  
 $\delta_r$  – повітряний зазор під основним полюсом, с;  
 $\delta_d$  – повітряний зазор під додатковим полюсом, см;  
 $P_{ТВ}$  – втрати на тертя і вентиляційні, Вт;  
 $j_{ш}$  – густина струму в обмотці паралельного збудження, А/мм<sup>2</sup>;  
 $j_d$  – густина струму в обмотці додаткових полюсів, А/мм<sup>2</sup>;  
 $U_{H3}$  – напруга незалежного збудження, В;  
 $D_k$  – діаметр колектора, см;  
 $B_{щ}$  – ширина щітки, см;  
 $L_{щ}$  – довжина щітки, см;  
 $N_{щб}$  – число щіток на щітковий бовт;  
 $p$  – число пар полюсів;  
 $a$  – число пар паралельних гілок обмотки якоря;  
 $Z$  – число пазів якоря;  
 $U_{II}$  – число елементарних пазів у реальному;  
 $N_{ел}$  – число елементарних провідників в одному ефективному;  
 $w_c$  – число витків у секції обмотки якоря;  
 $A_{пр}$  – розмір елементарного голого провідника по висоті паза, см;  
 $B_{пр}$  – розмір елементарного голого провідника по ширині паза, см;  
 $Q_{ел}$  – перетин елементарного провідника обмотки якоря, мм<sup>2</sup>;

$\xi_K$  – абсолютне значення скорочення кроку обмотки якоря;  
 $\Delta_{iB}$  – товщина виткової ізоляції провідника (на дві сторони), *см*;  
 $b_{iK}$  – товщина корпусної ізоляції по ширині паза, *см*;  
 $h_{iK}$  – товщина корпусної ізоляції по висоті паза, *см*;  
 $H_{п1}, B_{п}, H_{11}, H_{12}, H_{к1}, H_{s11}$  – розміри паза якоря, *см* (рис. Д.2, Д.3);  
 $N_K$  – число стрижнів компенсаційної обмотки на полюс;  
 $B_{пк}$  – ширина паза в полюсному наконечнику для КО (рис. Д.4), *см*;  
 $H_{пк}$  – висота паза компенсаційної обмотки (рис. Д.4), *см*;  
 $H_{s1к}$  – висота шлиця паза компенсаційної обмотки, *см*;  
 $a_d$  – число паралельних гілок ОДП і КО;  
 $j_{ст}$  – густина струму в стрижнях КО, *А/мм<sup>2</sup>*;  
 $j_{дуг}$  – густина струму в дугах КО, *А/мм<sup>2</sup>*.

#### ***Вхідні дані для остаточного розрахунку***

$Q_{wш}$  – переріз проводу обмотки паралельного збудження, *мм<sup>2</sup>*;  
 $Q_{wd}$  – переріз проводу ОДП і послідовної обмотки, *мм<sup>2</sup>*;  
 $L_{wш}$  – середня довжина витка обмотки паралельного збудження, *см*;  
 $L_{wc}$  – середня довжина витка обмотки послідовного збудження, *см*;  
 $L_{wd}$  – середня довжина витка обмотки додаткових полюсів, *см*;  
 $Q_{ст}$  – переріз стрижня компенсаційної обмотки, *мм<sup>2</sup>*;  
 $Q_{дуг}$  – переріз дуг компенсаційної обмотки, *мм<sup>2</sup>*.

#### ***Вхідні дані для досліджень $\omega_{max}$***

$n_{max}$  – максимальна частота обертання, *об/хв*;  
 $F_{min}$  – мінімальна МРС збудження, *А*;  
 $P_{ТВМ}$  – втрати на тертя і вентиляцію при  $\omega_{max}$ , *Вт*.

#### ***Значення ознак***

$JPI = 1$  – клас ізоляції ОЯ – В;  $JPI = 2$  – клас ізоляції ОЯ – F  
 $JPB = 1$  – кріплення обмотки якоря клинами;  
 $JPB = 2$  – кріплення бандажами з немагнітного сталевго проводу;  
 $JPB = 3$  – кріплення бандажами з магнітного сталевго проводу;  
 $JPB = 4$  – кріплення обмотки склобандажами

$JPR = 0$  – послідовне збудження –  $F_c^* = 1, K_v = 0, U_{H3} = 0$   
 $JPR = 1$  – змішане збудження –  $F_c^* > 0, K_v > 0, U_{H3} > 0$   
 $JPR = 2$  – паралельне збудження –  $F_c^* = 0, K_v > 0, U_{H3} = 0$   
 $JPR = 3$  – незалежне збудження –  $F_c^* = 0, K_v = 0, U_{H3} > 0$   
 $JPR = 4$  – послідовне з легкою обмоткою незалежного збудження –  
 $F_c^* > 1, K_v = 0, U_{H3} > 0$   
 $JPK = 0$  – **Немає** компенсаційної обмотки;  
 $JPK = 1$  – **Є** компенсаційна обмотка

JPC	Марка сталі			JPC	Марка сталі		
	якір	полюса	станина		якір	полюса	станина
1	2312	3411	Ст. 3	4	2312	Ст.3 (1мм)	Ст. 3
2	2013	3411	Ст. 3	5	2013	Ст.3 (1мм)	Ст. 3
3	2411	3411	Ст. 3	6	2411	Ст. 3 (1мм)	Ст. 3

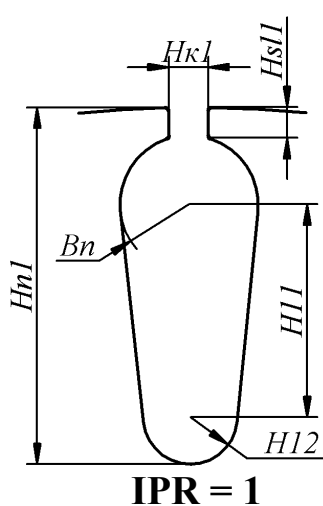


Рис. Д.2.  
 Напівзакритий  
 овальний паз якоря

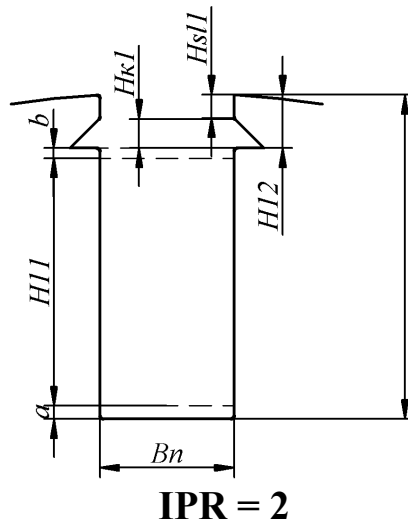


Рис. Д.3.  
 Відкритий  
 прямокутний  
 паз якоря

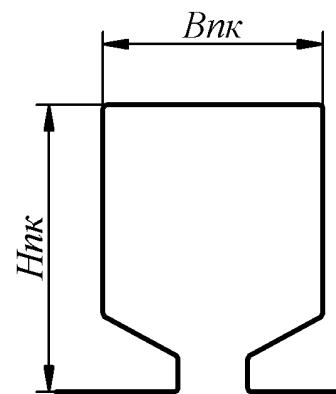


Рис. Д.4.  
 Паз компенсаційної  
 обмотки

Файл вихідних даних розташовується в папці з іменем файлу вхідних даних («\*») каталогу «РТ» робочого диска ПК.

### Д.3. Результати розрахунку ДПС

У результаті виконання повного об'єму розрахунків формуються текстові файли результатів «\*. xxx», «\*. r1», «\*. r2», «\*. r3», «compare.txt», а також графічні файли з робочими, регульовальними і механічними характеристиками.



Файл \*. xxx

### ХАРАКТЕРИСТИКА НЕРОБОЧОГО ХОДУ

E*	0.0	2.00E-1	5.00E-1	8.0E-1	9.00E-1	1.00E+0	1.10E+0	1.15E+0	1.20E+0	1.30E+0
E	0.0	5.54E+1	1.38E+2	2.22E+2	2.49E+2	2.77E+2	3.05E+2	3.18E+2	3.32E+2	3.60E+2
Φ	0.0	2.93E-3	7.32E-3	1.17E-2	1.31E-2	1.46E-02	1.61E-2	1.68E-2	1.76E-2	1.90E-2
Bδ	0.0	1.52E-1	3.80E-1	6.08E-1	6.84E-1	7.60E-01	8.36E-1	8.74E+1	9.12E-1	9.89E-1
Bzmax	0.0	4.60E-1	1.15E+0	1.84E+0	2.07E+0	2.30E+0	2.53E+0	2.64E+0	2.76E+0	2.99E+0
Bzср	0.0	3.29E-1	8.22E-1	1.32E+0	1.48E+0	1.64E+0	1.81E+0	1.90E+0	2.01E+0	2.12E+0
Bzmin	0.0	2.61E-1	6.42E-1	1.03E+0	1.24E+0	1.35E+0	1.46E+0	1.55E+0	1.67E+0	1.76E+0
Bj	0.0	1.91E-1	4.82E-1	7.61E-1	8.61E-1	9.51E-1	1.02E+0	1.11E+0	1.16E+0	1.21E+0
Bπ	0.0	3.51E-1	8.71E-1	1.42E+0	1.62E+0	1.72E+0	1.92E+0	2.0E+0	2.10E+0	2.31E+0
Bc	0.0	2.51E-1	6.31E-1	1.01E+0	1.12E+0	1.32E+0	1.41E+0	1.5`E+0	1.50E+0	1.61E+0
Hzmax	0.0	7.41E-1	3.51E+0	1.21E+2	3.41E+2	8.22E+2	1.73E+3	2.1`E+3	2.50E+3	3.31E+3
Hzср	0.0	5.61E-1	1.51E+0	6.12E+0	1.42E+1	4.62E+1	1.03E+2	1.56E+2	2.30E+2	4.80E+2
Hzmin	0.0	4.35E-1	9.00E-1	2.55E+0	3.52E+0	5.15E+0	1.05E+1	1.43E+1	2.15E+1	5.57E+1
Hзроз	0.0	5.69E-1	1.74E+0	2.54E+1	6.80E+1	1.69E+2	3.49E+2	4.54E+2	5.75E+2	8.88E+2
Hj	0.0	3.24E-1	7.46E-1	1.23E+0	1.68E+0	2.16E+0	2.68E+0	2.97E+0	3.42E+0	4.45E+0
Hπ	0.0	5.93E-1	1.48E+0	4.95E+0	9.13E+0	2.45E+1	1.31E+2	4.36E+2	9.35E+2	0.00E+0
Hc	0.0	2.02E+0	5.17E+0	9.39E+0	1.15E+1	1.46E+1	2.02E+1	2.45E+1	3.04E+1	4.72E+1
Fδ	0.0	4.39E+2	1.10E+3	1.75E+3	1.97E+3	2.19E+3	2.41E+3	2.52E+3	2.63E+3	2.85E+3
Fz	0.0	6.15E+0	8.96E+1	2.40E+2	4.54E+2	6.24E+2	1.23E+3	1.60E+3	2.03E+3	3.14E+3
Fj	0.0	2.53E+0	5.82E+0	9.60E+0	1.31E+1	1.69E+1	2.09E+1	2.32E+1	2.67E+1	3.47E+1
Fδzj	0.0	4.43E+2	1.11E+3	1.85E+3	2.23E+3	2.80E+3	3.66E+3	4.15E+3	4.69E+3	6.02E+3
Fπ	0.0	3.83E+0	9.57E+0	3.19E+1	5.89E+1	1.58E+2	8.46E+2	2.81E+3	6.03E+3	0.00E+0
Frc	0.0	4.19E+1	1.04E+2	1.68E+2	1.89E+2	2.09E+2	2.30E+2	2.41E+2	2.51E+2	2.72E+2
Fc	0.0	3.54E+1	9.07E+1	1.65E+2	2.03E+2	2.57E+2	3.55E+2	4.30E+2	5.34E+2	8.28E+2
Bzk	0.0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
Hzk	0.0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
Fzk	0.0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
Fсум	0.0	5.24E+2	1.31E+3	2.22E+3	2.68E+3	3.43E+3	5.09E+3	7.63E+3	1.15E+4	7.12E+3
Fo	0.0	2.10E+3	5.25E+3	8.9E+3	1.07E+4	1.37E+4	2.04E+4	3.05E+4	4.60E+4	2.85E+4
E/ω	0.0	3.07E-1	7.69E-1	1.23E+0	1.38E+0	1.54E+0	1.69E+0	1.77E+0	1.84E+0	2.00E+0

$E^*$  – ЕРС, *в. о.*;  
 $E$  – ЕРС, *В*;  
 $\Phi$  – магнітний потік у повітряному зазорі, *Вб*;  
 $B\delta$  – індукція в повітряному зазорі, *Тл*,  
 $Bz_{\max}$  – індукція в мінімальному перерізі зубця, *Тл*,  
 $Bz_{\text{сер}}$  – індукція в середньому перерізі зубця, *Тл*;  
 $Bz_{\text{мін}}$  – індукція в максимальному перерізі зубця, *Тл*;  
 $B_j$  – індукція в спинці якоря, *Тл*;  
 $B_p$  – індукція в осерді головного полюса, *Тл*;  
 $B_c$  – індукція в станині, *Тл*;  
 $H_{z\max}$  – напруженість магнітного поля в мінімальному перерізі зубця, *А/см*;  
 $H_{z\text{сер}}$  – напруженість магнітного поля в середньому перерізі зубця, *А/см*;  
 $H_{z\text{мін}}$  – напруженість магнітного поля в максимальному перерізі зубця, *А/см*;  
 $H_{z\text{розр}}$  – розрахункове значення напруженості магнітного поля в зубцях якоря, *А/с*;  
 $H_j$  – напруженість магнітного поля в спинці якоря, *А/см*;  
 $H_p$  – напруженість магнітного поля в осерді головного полюса, *А/см*;  
 $H_c$  – напруженість магнітного поля в станині, *А/см*;  
 $F_b$  – МРС повітряного зазору, *А*;  
 $F_z$  – МРС зубців якоря, *А*;  
 $F_j$  – МРС спинки якоря, *А*;  
 $F_{bzj}$  – МРС ділянок перехідного шару, *А*;  
 $F_p$  – МРС головних полюсів, *А*;  
 $F_c$  – МРС станини, *А*;  
 $F_{гс}$  – МРС зазору між станиною і головним полюсом, *А*;  
 $F_{зк}$  – МРС зубців полюсних наконечників, *А*;  
 $F_{\text{сум}}$  – сума МРС усіх ділянок (**на 1 полюс**), *А*;  
 $F_o$  – сумарна МРС **на 2р полюсів**, *А*;  
 $E/\omega = c \cdot \Phi$  – відношення ЕРС до кутової швидкості обертання, *Вб*.

## Файл \*.r1

### РЕЗУЛЬТАТИ ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРАХУНКУ

#### Електромагнітні навантаження й густина струму обмотки якоря:

$\Phi_H = 8.29E-0003$   $B_{BH} = 6.90E-0001$   $B_{zmax} = 2.14E+0000$

$B_j = 8.79E-0001$   $B_m = 1.65E+0000$   $B_c = 1.30E+0000$

$A = 2.93E+0002$  А/см  $J_a = 5.93E+0000$  А/кв.мм  $I_{aH} = 1.59E+0002$  А

#### Бандажи зі склоленти:

$N_{BK} = 2.00E-0001$   $W_{BJP} = 2.70E+0001$   $W_{BJL} = 2.00E+0001$   $L_{BJP} =$

$3.90E+0000$   $L_{BJL} = 3.75E+0000$

#### Основні розміри (см):

$L_d/D = 7.18E-0001$   $H_j = 3.82E+0000$   $B_{zmax} = 1.64E+0000$   $B_{zmin} = 9.22E-0001$

$B_{zcp} = 1.28E+0000$

$K_{d1} = 1.25E+0000$   $K_{d2} = 1.00E+0000$   $K_{d3} = 1.17E+0000$   $k_{d4} = 1.00E+0000$

$K_d = 1.46E+0000$

#### Колектор і щітки:

$K = 1.05E+0002$   $t_k = 3.74E-0001$   $U_{kcp} = 4.19E+0000$   $J_{щ} = 1.55E+0001$   $L_k =$

$1.06E+0001$

$W_a = 1.05E+0002$   $R_a(t) = 3.15E-0002$

#### Комутація:

$B_{kz} = 3.73E+0000$ , см  $L = 4.81E+0000$   $E_r = 6.26E-0001$ , В

#### Додаткові полюси:

$B_k = 1.55E-0001$   $\Phi_{del_d} = 5.49E-0004$   $\Phi_{md} = 1.65E-0003$   $B_{md} = 8.93E-0001$

$B_{cmax} = 1.62E+0000$

$AT/2 = 2.08E+0003$   $F_{ko} = 0.00E+0000$   $F_{aq} = 2.08E+0003$   $F''_d = 2.84E+0003$

$K_{bd} = 1.17E+0000$

$W_d = 1.80E+0001$   $F_d = 2.86E+0003$   $S_{прд} = 3.19E+0001$   $R_d(t) = 2.12E-0002$

#### Обмотки збуження:

$E_H = 9.92E+0001$   $F_e = 2.21E+0003$   $F_{qdH} = 2.25E+0002$

$F_{шо} = 2.21E+0003$   $W_{шо} = 4.04E+0002$   $I_{шH} = 5.47E+0000$   $S_{прш} = 1.09E+0000$

$R_{ш}(t) = 1.58E+0001$

$F_{co} = 3.17E+0002$   $W_{co} = 2.00E+0000$   $S_{прс} = 3.19E+0001$   $R_c(t) = 2.55E-0003$

$R_k(t) = 0.00E+0000$

#### Електромагнітні навантаження при номінальній ЕРС

$\Phi_H$  – магнітний потік у повітряному зазорі, Вб;  $B_{дH}$  – індукція в повітряному зазорі, Тл;  $B_{zmax}$  – індукція в мінімальному перерізі зубця, Тл;  $B_j$  – індукція в спинці якоря, Тл;  $B_m$  – індукція в осерді головного полюса, Тл;  $B_c$  – індукція в станині, Тл;  $A$  – лінійне навантаження, А/см;  $J_a$  – густина

струму в обмотці якоря,  $A \cdot mm^2$ ;  $I_{ян}$  – номінальний струм якоря,  $A$ .

### **Розрахунки бандажів**

$H_{бк}$  – висота бандажної канавки,  $см$ ;  $W_{бжп}$  – число витків бандажа на пазовій частині ОЯ;  $W_{бжл}$  – число витків бандажа на лобовій частині ОЯ;  $L_{бжп}$  – довжина бандажних канавок у пазовій частині ОЯ,  $см$ ;  $L_{бжл}$  – довжина бандажів у лобовій частині ОЯ,  $см$ .

### **Основні розміри**

$L\delta/D$  – відношення довжини якоря до зовнішнього діаметра якоря;  $H_j$  – висота спинки якоря,  $см$ ;  $V_{zmax}$  – найбільша ширина зубця,  $см$ ;  $V_{zmin}$  – найменша ширина зубця,  $см$ ;  $V_{zctr}$  – середня ширина зубця,  $см$ ;  $K\delta 1$  – коефіцієнт повітряного зазору, що враховує зубчастість якоря;  $K\delta 2$  – коефіцієнт повітряного зазору, що враховує бандажні канавки;  $K\delta 3$  – коефіцієнт повітряного зазору, що враховує пакетування якоря;  $K\delta 4$  – коефіцієнт повітряного зазору, що враховує наявність КО;  $K\delta$  – результуючий коефіцієнт повітряного зазору.

### **Колектор і щітки**

$K$  – число колекторних пластин;  $T_k$  – ширина колекторної пластини,  $см$ ;  $U_k$  – середнє значення напруги між колекторними пластинами,  $V$ ;  $J_{щ}$  – густина струму в щітковому контакті,  $A/cm^2$ ;  $L_k$  – довжина колектора,  $см$ ;  $W_a$  – число витків ОЯ;  $R_a(t)$  – опір ОЯ при робочій температурі,  $Ом$ .

### **Комутація**

$W_{кз}$  – ширина комутаційної зони,  $см$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт магнітної провідності паза;  $E_r$  – середнє значення реактивної ЕРС,  $V$ .

### **Додаткові полюси**

$B_k$  – середня індукція в повітряному зазорі під ДП,  $Tл$ ;  $\Phi_{delд}$  – магнітний потік ДП у повітряному зазорі,  $Вб$ ;  $\Phi_{мд}$  – магнітний потік в осерді ДП,  $Вб$ ;  $B_{мд}$  – індукція в осерді ДП,  $Tл$ ;  $B_{смах}$  – максимальна індукція в ярмі станини,  $Tл$ ;  $K\delta д$  – коефіцієнт повітряного зазору ДП;  $F_{ко}$  – МРС компенсаційної обмотки,  $A$ ;  $F_{ақ}$  – МРС якоря на лінії геометричної нейтралі,  $A$ ;  $F_{д''}$  – попереднє значення МРС обмотки додаткового полюса,  $A$ ;  $W_{д}$  – число витків обмотки ДП на 1 полюс;  $F_{д}$  – остаточнє значення МРС обмотки додаткового полюса,  $A$ ;  $S_{прд}$  – переріз провідника обмотки ДП,  $мм^2$ ;  $R_{д}(t)$  – опір обмотки ДП при робочій температурі,  $Ом$ .

### **Обмотки збудження**

$E_n$  – номінальне значення ЕРС,  $B$ ;  $F_e$  – МРС збудження на 1 полюс,  $A$ ;  $F_{qdn}$  – уточнене значення МРС, необхідної для компенсації розмагнічувальної дії поля якоря,  $A$ ;  $F_{aq}$  – найбільше значення МРС поля якоря,  $A$ ;  $I_{шн}$  – номінальний струм збудження,  $A$ ;  $F_{шо}$  – МРС паралельної обмотки збудження (на 1 полюс),  $A$ ;  $W_{шо}$  – число витків паралельної ОЗ;  $S_{прш}$  – переріз провідника паралельної обмотки,  $мм^2$ ;  $D_{прш}$  – діаметр провідника паралельної ОЗ,  $см$ ;  $R_{ш}(t)$  – опір паралельної ОЗ при робочій температурі,  $Ом$ ;  $F_{со}$  – МРС послідовної обмотки збудження (на 1 полюс),  $A$ ;  $W_{со}$  – число витків послідовної ОЗ;  $S_{прс}$  – переріз провідника послідовної ОЗ,  $мм^2$ ;  $R_{с}(t)$  – опір послідовної ОЗ,  $Ом$ ;  $R_{к}(t)$  – опір компенсаційної обмотки,  $Ом$ .

**Файл \*. r2**

**РЕЗУЛЬТАТИ ОСТАТОЧНОГО РОЗРАХУНКУ**

**Масси (кг):**

G<sub>мя</sub>= 8.36E+0000 G<sub>мш</sub>= 6.90E+0000 G<sub>мд</sub>= 7.85E+0000 G<sub>мс</sub>= 9.45E-0001  
G<sub>мк</sub>= 7.8E+0000  
G<sub>из</sub>= 3.64E+0000 G<sub>са</sub>= 1.09E+0001 G<sub>сз</sub>= 6.25E+0000 М<sub>еди</sub>= 2.41E+0001  
С<sub>т</sub>.= 6.46E+0001

**Втрати (Вт):**

P<sub>са</sub>= 4.39E+0001 P<sub>сз</sub>= 7.65E+0001 P<sub>трщ</sub>= 1.81E+0002 P<sub>трп</sub>= 1.50E+0002  
P<sub>эя</sub>= 1.39E+0003 P<sub>эщ</sub>= 3.17E+0002 P<sub>эш</sub>= 6.02E+0002 P<sub>сум</sub>= 2.94E+0003

**Робочі характеристики при Із=Ізном:**

P2,кВт	n2,об/хв	M2,Нм	ККД,%	I1,А	P1,кВт
2.08E+0000	1.92E+0003	1.04E+0001	6.47E+0001	2.38E+0001	3.22E+0000
4.55E+0000	1.89E+0003	2.31E+0001	7.79E+0001	4.76E+0001	5.84E+0000
7.73E+0000	1.85E+0003	4.01E+0001	8.28E+0001	7.94E+0001	9.33E+0000
1.00E+0001	1.82E+0003	5.28E+0001	8.39E+0001	1.03E+0002	1.19E+0001
1.22E+0001	1.79E+0003	6.56E+0001	8.41E+0001	1.27E+0002	1.45E+0001
1.37E+0001	1.77E+0003	7.42E+0001	8.40E+0001	1.43E+0002	1.63E+0001
1.51E+0001	1.75E+0003	8.28E+0001	8.37E+0001	1.59E+0002	1.81E+0001
1.65E+0001	1.73E+0003	9.14E+0001	8.33E+0001	1.75E+0002	1.98E+0001
1.79E+0001	1.71E+0003	1.00E+0002	8.28E+0001	1.90E+0002	2.16E+0001
2.05E+0001	1.67E+0003	1.17E+0002	8.17E+0001	2.22E+0002	2.50E+0001

**Номинальні дані**

1.51E+0001 1.75E+0003 8.28E+0001 8.37E+0001 1.59E+0002  
1.81E+0001

### **Втрати, Вт**

$P_{ca}$  – втрати у сталі ярма якоря;  $P_{cz}$  – втрати у сталі зубців якоря;  $P_{трщ}$  – механічні втрати на тертя щіток;  $P_{тпв}$  – втрати в підшипниках і вентиляційні;  $P_{ея}$  – електричні втрати в колі якоря;  $P_{ещ}$  – електричні втрати в щітковому контакті;  $P_{еш}$  – електричні втрати в колі паралельної ОЗ;  $P_{сум}$  – сумарні втрати.

### **Маси, кг**

$G_{мя}$  – маса міді обмотки якоря;  $G_{мш}$  – маса міді шунтової обмотки;  $G_{мд}$  – маса міді обмотки додаткових полюсів;  $G_{мс}$  – маса міді послідовної обмотки;  $G_{мк}$  – маса міді колектора;  $G_{сд}$  – маса сталі додаткових полюсів;  $G_{са}$  – маса сталі спинки якоря;  $G_{сз}$  – маса сталі зубців якоря;  $M_{ідь}$  – сумарна маса міді машини;  $Сталь$  – сумарна маса сталі.

### **Робочі характеристики при $I_B = I_{вном}$**

$P_2$  – масив значень корисної потужності,  $кВт$ ;  $n_2$  – масив значень частоти обертання,  $об/хв$ ;  $M_2$  – масив значень обертаючого моменту,  $Н·м$ ;  $ККД$  – масив значень коефіцієнта корисної дії,  $\%$ ;  $I_1$  – масив значень струму якоря,  $A$ ;  $P_1$  – масив значень споживаної потужності,  $кВт$ .

### **Дослідження при $\omega_{max}$**

#### **Втрати, Вт**

$P_{ca}$  – втрати в сталі ярма якоря;  $P_{cz}$  – втрати в сталі зубців якоря;  $P_{трщ}$  – механічні втрати на тертя щіток;  $P_{тпв}$  – втрати в підшипниках і вентиляційні;  $P_{ея}$  – електричні втрати в колі якоря;  $P_{ещ}$  – електричні втрати у щітковому контакті;  $P_{еш}$  – електричні втрати в колі паралельної ОЗ;  $P_{сум}$  – сумарні втрати.

### **Регулювальні характеристики при $F_3 = var$**

$F_3$  – масив значень МРС збудження,  $A$ ;  $N_2$  – масив значень частоти обертання,  $об/хв$ ;  $M_2$  – масив значень обертаючого моменту,  $Н·м$ ;  $ККД$  – масив значень коефіцієнта корисної дії,  $\%$ ;  $P_2$  – масив значень корисної потужності,  $кВт$ ;  $P_1$  – масив значень споживаної потужності,  $кВт$ .

## Файл порівняння результатів розрахунків

### files :

1 – Файл TE022.r3

2 – Файл DK210A3.r3

### Електромагнітні навантаження і густина струму обмотки якоря:

1 –  $\Phi_H = 1.4E-0002$   $B_{\delta H} = 7.6E-0001$   $B_{zmax} = 2.3E+0000$

2 –  $\Phi_H = 2.9E-0002$   $B_{\delta H} = 8.1E-0001$   $B_{zmax} = 2.4E+0000$

1 –  $B_j = 9.5E-0001$   $B_{\Pi} = 1.7E+0000$   $B_c = 1.2E+0000$

2 –  $B_j = 1.4E+0000$   $B_{\Pi} = 1.6E+0000$   $B_c = 1.3E+0000$

1 –  $A = 3.4E+0002$  А/см  $J_a = 5.1E+0000$  А/кв.мм  $I_{яH} = 1.7E+0002$  А

2 –  $A = 4.2E+0002$  А/см  $J_a = 7.0E+0000$  А/кв.мм  $I_{яH} = 2.2E+0002$  А

### Комутація:

1 –  $B_{кз} = 3.8E+0000, см$   $\lambda = 5.2E+0000$   $E_r = 1.3E+0000, В$

2 –  $B_{кз} = 4.8E+0000, см$   $\lambda = 3.5E+0000$   $E_r = 1.6E+0000, В$

### Додаткові полюси:

1 –  $B_k = 1.9E-0001$   $\Phi_{delD} = 8.4E-0004$   $\Phi_{мд} = 2.5E-0003$   $B_{мд} = 8.9E-0001$   
 $B_{стax} = 1.5E+0000$

2 –  $B_k = 1.6E-0001$   $\Phi_{delD} = 1.3E-0003$   $\Phi_{мд} = 4.0E-0003$   $B_{мд} = 8.9E-0001$   
 $B_{стax} = 1.5E+0000$

### Обмотки збудження:

1 –  $E_H = 2.8E+0002$   $F_e = 3.4E+0003$   $F_{q\delta H} = 3.9E+0002$

2 –  $E_H = 5.1E+0002$   $F_e = 3.9E+0003$   $F_{q\delta H} = 7.7E+0002$

1 –  $F_{шо} = 3.8E+0001$   $W_{шо} = 1.2E+0001$   $I_{шH} = 3.1E+0000$   $S_{прш} = 1.0E+0000$   
 $R_{ш(t)} = 1.1E-0002$

2 –  $F_{шо} = 4.6E+0001$   $W_{шо} = 2.7E+0001$   $I_{шH} = 1.7E+0000$   $S_{прш} = 7.2E-0001$   
 $R_{ш(t)} = 3.1E+0000$

1 –  $F_{со} = 3.8E+0003$   $W_{со} = 2.3E+0001$   $S_{прс} = 3.5E+0001$   $R_c(t) = 5.1E-0002$   
 $R_k(t) = 0.0E+0000$

2 –  $F_{со} = 4.7E+0003$   $W_{со} = 2.1E+0001$   $S_{прс} = 4.4E+0001$   $R_c(t) = 5.2E-0002$   
 $R_k(t) = 0.0E+0000$

### Втрати (Вт):

1 –  $P_{ca} = 3.72E+0001$   $P_{cz} = 7.06E+0001$   $P_{трщ} = 3.63E+0002$   $P_{трп} = 2.50E+0002$

2 –  $P_{ca} = 3.60E+0002$   $P_{cz} = 3.12E+0002$   $P_{трщ} = 5.72E+0002$   $P_{трп} = 7.00E+0002$

1 –  $P_{ея} = 3.80E+0003$   $P_{эщ} = 3.33E+0002$   $P_{еш} = 7.54E+0001$   $P_{сум} = 5.44E+0003$

2 –  $P_{ея} = 8.58E+0003$   $P_{эщ} = 4.40E+0002$   $P_{еш} = 4.10E+0001$   $P_{сум} = 1.22E+0004$

### Номинальні дані:



	$P_2, \text{кВт}$	$n_2, \text{об/хв}$	$M_2, \text{Нм}$	ккд, %	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{кВт}$
1	4.46E+0001	1.71E+0003	1.67E+0002	8.76E+0001	2.50E+0002	5.09E+0001
2	1.08E+0002	1.50E+0003	2.20E+0002	8.92E+0001	6.93E+0002	1.21E+0002

### РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПРИ $\omega_{\max}$

#### Втрати (Вт):

1 –  $P_{ca} = 1.26E+0002$   $P_{cz} = 2.13E+0002$   $P_{трщ} = 8.20E+0002$   $P_{трп} = 5.64E+0002$

2 –  $P_{ca} = 4.26E+0002$   $P_{cz} = 1.85E+0002$   $P_{трщ} = 7.55E+0002$   $P_{трп} = 9.23E+0002$

1 –  $P_{ея} = 3.80E+0003$   $P_{ещ} = 3.33E+0002$   $P_{еш} = 0.00E+0000$   $P_{сум} = 6.37E+0003$

2 –  $P_{ея} = 8.58E+0003$   $P_{ещ} = 4.40E+0002$   $P_{еш} = 0.00E+0000$   $P_{сум} = 1.25E+0004$

### Файли графіки

За результатом розрахунків формуються графіки характеристик неробочого ходу (рис.12.5), робочі характеристики при номінальному збудженні (рис.12.10) та характеристики двигуна при регулюванні частоти обертання вверх від номінальної зміною магнітного потоку (рис. 12.13).

### Д.4. Розрахунок характеристик ДПС на ПК

Розрахунок характеристик виконується в опції «Аналіз характеристик ДПС» головного меню програми після повного розрахунку двигуна. Для роботи програми необхідні файли \*.xxx, \*.r1.

Програма дозволяє виконати розрахунок електромеханічних і механічних характеристик за таких умов:  $R_d = \text{var}$ ;  $U_a = \text{var}$ ;  $\Phi = \text{var}$ ; генераторне гальмування при  $U_a = 0$ ,  $R_T = \text{var}$ ; гальмування протиковмиканням при  $U_a = -U_a$ ,  $R_T = \text{var}$ .

Виконується розрахунок індуктивності обмотки збудження –  $L_3 = \varphi(I_3)$ .

За результатами розрахунків у папці користувача каталогу “Pt” формуються такі файли (рис. Д.5...Д.15):

- \*.wir – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(I_a, R_D)$   $R_D^* = 0, 0.5, 1$ ;
  - \*.wmr – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(M, R_D)$ ;
  - \*.wiu – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(I_a, U)$   $U = (1, 0.5, 0.35)U_H$ ;
  - \*.wmu – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(M, U)$ ;
  - \*.wif – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(I_a, \Phi)$   $\Phi = (1, 0.5, 0.35)\Phi_H$ ;
  - \*.wmf – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(M, \Phi)$ ;
  - \*.wi0 – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(I_a, R_T)$   $U_a = 0, R_T^* = 1, 1.5$ ;
  - \*.wm0 – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(M, R_T)$ ;
  - \*.wi – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(I_a, R_T)$   $U_a = -U_{aH}, R_T^* = 1, 1.5$ ;
  - \*.wm – файл з даними залежності  $\omega = \varphi(M, R_T)$ ;
  - \*.Lv – файл з даними залежності  $L_3 = \varphi(I_3)$ ,
- де \* – ім'я файла вхідних даних.

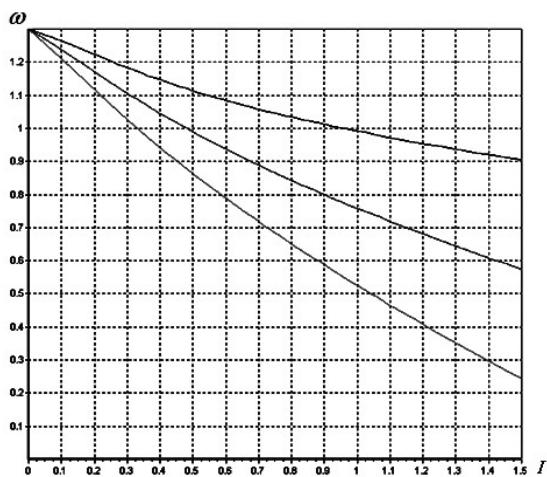


Рис. Д.5. Залежність  $\omega = \varphi(I_a)$

$$R_D^* = 0, 0.5, 1$$

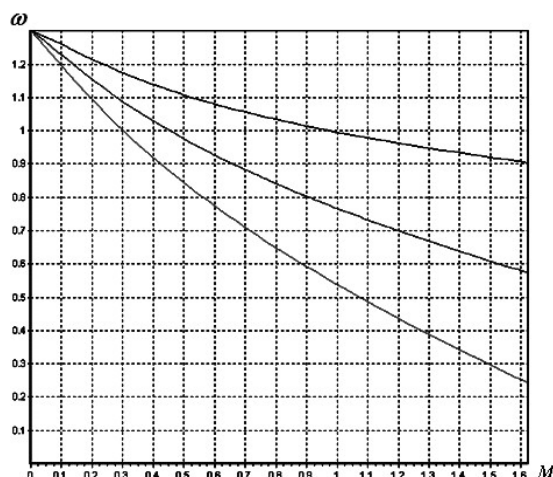


Рис. Д.6. Залежність  $\omega = \varphi(M)$

$$R_D^* = 0, 0.5, 1$$

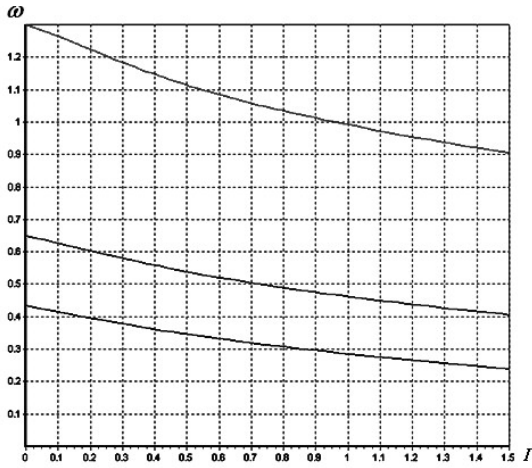


Рис. Д.7. Залежність  $\omega = \varphi(I_a)$   
 $U^* = 1, 0.5, 0.35$

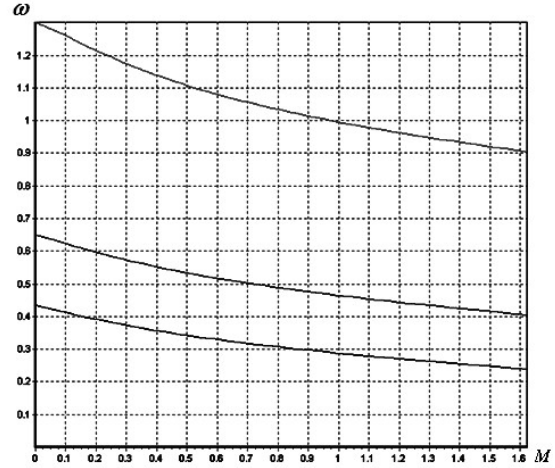


Рис. Д.8. Залежність  $\omega = \varphi(M)$   
 $U^* = 1, 0.5, 0.35$

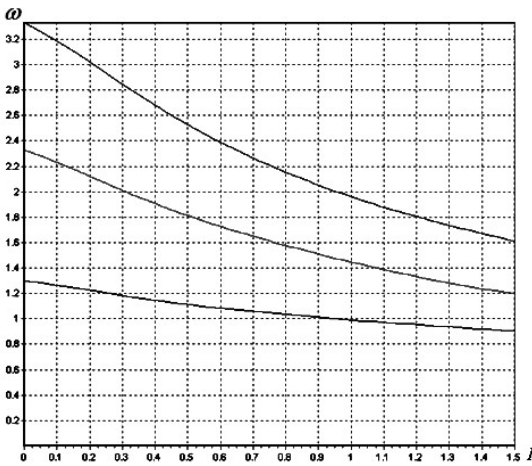


Рис. Д.9. Залежність  $\omega = \varphi(I_a)$   
 $\Phi^* = 0.35, 0.5, 1$

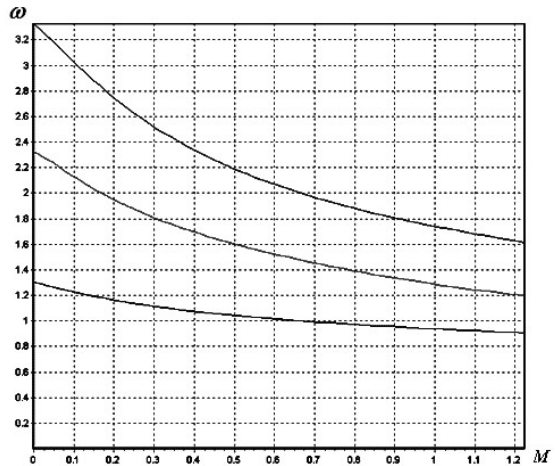


Рис. Д.10. Залежність  $\omega = \varphi(M)$   
 $\Phi^* = 0.35, 0.5, 1$

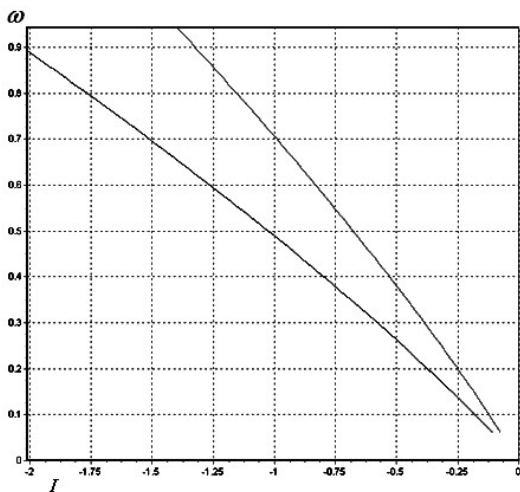


Рис. Д.11. Залежність  $\omega = \varphi(I_T)$   
 $U_a = 0, R_T^* = 1, 1.5$

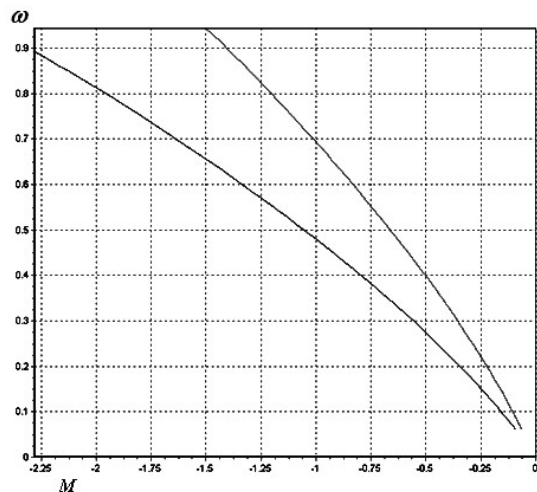


Рис. Д.12. Залежність  $\omega = \varphi(M_T)$   
 $U_a = 0, R_T^* = 1, 1.5$

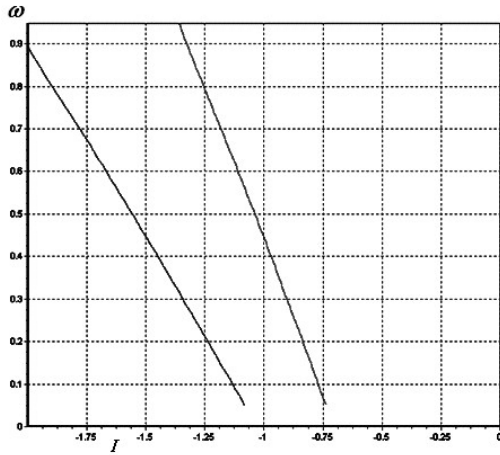


Рис. Д.13. Залежність  $\omega = \varphi(I_T)$

$$U_a = -U_a, R_T^* = 1, 1.5$$

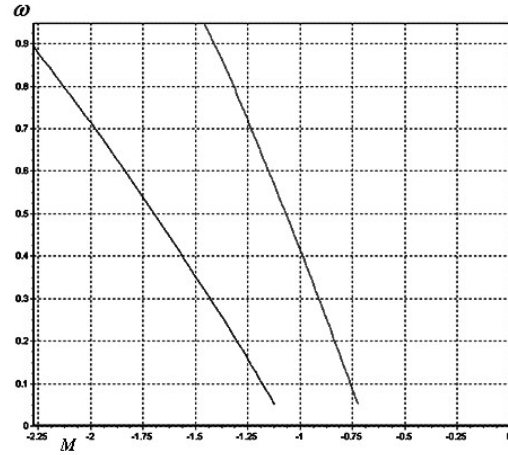


Рис. Д.14. Залежність  $\omega = \varphi(M_T)$

$$U_a = -U_a, R_T^* = 1, 1.5$$

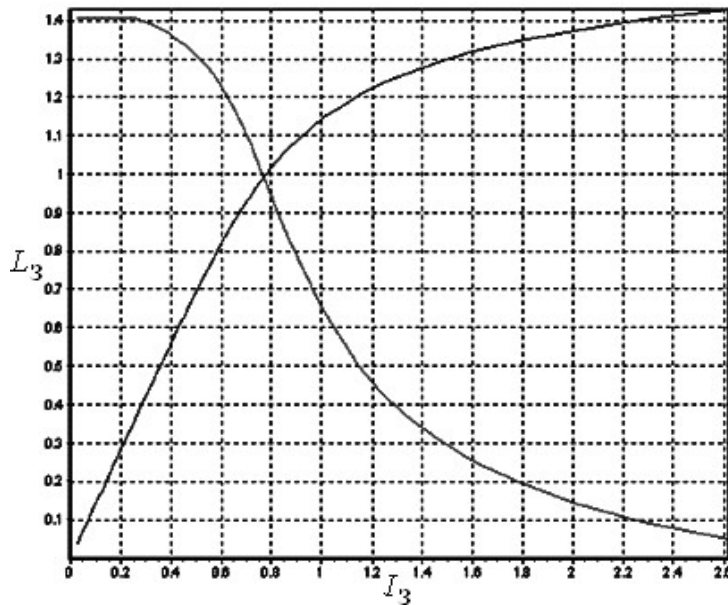


Рис. Д.15.  
Залежність  
 $L_3^* = \varphi(I_3^*)$

## Д.5. Застосування ПК при аналізі тягових електродвигунів

### Об'єм досліджень

Програма дозволяє виконати такі дослідження тягових двигунів постійного струму:

- розрахувати характеристики на ободі колеса –  $\mathcal{G} = \varphi(I_a), \eta = \varphi(I_a), F = \varphi(I_a)$ ;
- розрахувати характеристики реостатного пуску –  $\mathcal{G} = \varphi(R_{II}), \mathcal{G} = \varphi(I_a)$ ;
- розрахувати характеристики пуску при живленні від регулятора напруги –  $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$ ;
- розрахувати характеристики розгону –  $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$ ;
- розрахувати характеристики реостатного гальмування –

$$\mathcal{G} = \varphi(R_{\Gamma}), \quad \mathcal{G} = \varphi(I_a).$$

Характеристики режимів роботи досліджуються при різних значеннях початкового прискорення транспортного засобу й коефіцієнта пульсації струму якоря.

### **Формування вхідних даних**

Файл вхідних даних можна формувати в ручному режимі, заносючи дані до таблиці (рис. Д.16) або в автоматичному режимі, для чого необхідно завантажити файли результатів електромагнітного розрахунку двигуна – **\*.ipt, \*.r1, \*.xxx**. Робота виконується з використанням опції «Файл» панелі (рис. Д.16).

### **Вхідні дані**

$P_2$  – номінальна потужність двигуна, *кВт*;

$U_H$  – номінальна напруга двигуна, *В*;

$I_{ан}$  – номінальний струм двигуна, *А*;

$R_a$  – сумарний активний опір кола якоря ( $R_a = R_{оя} + R_{ос} + R_{одп}$ ), *Ом*;

$\Delta U_{щ}$  – падіння напруги на щітках, *В*;

$N_a$  – число ефективних провідників обмотки якоря;

$a$  – число пар паралельних кіл обмотки якоря;

$p$  – число пар полюсів двигуна;

$F_3 \min$  – мінімальне значення МРС двигуна, *А*;

$F_{ш}$  – номінальна МРС паралельної обмотки збудження, *А*;

$F_c$  – номінальна МРС послідовної обмотки збудження, *А*;

$F_{qдн}$  – номінальне значення поперечної реакції якоря, *А*;

$F_{сум}$  – сумарна МРС двигуна, *А*;

$\Phi_H$  – номінальний потік двигуна, *Вб*;

$n_H$  – номінальна частота обертання валу двигуна, *об/хв*;

$n_{max}$  – максимальна частота обертання валу двигуна, *об/хв*;

$\Delta P_{ст}, \Delta P_{тщ}, \Delta P_{п}, \Delta P_{вент}$  – номінальні втрати в сталі, тертя щіток, тертя підшипників, вентиляцію, *Вт*;

$D_a, D_k$  – діаметри якоря та ведучого колеса, *м*;

$\mu$  – передатне відношення редуктора;

$M_{рс0}, M_{рс}$  – маса ненавантаженого та навантаженого рухомого складу, *кг*;

$\gamma_H$  – коефіцієнт інерції обертових частин нормально навантаженого рухомого складу;

$w_0$  – середній питомий опір руху за час реостатного пуску,  $H/m$ ;

$\psi$  – коефіцієнт тертя колеса рухомого складу о поверхню руху;

$R_c, R_{ш}$  – активний опір послідовної та паралельної обмоток,  $Om$ ;

$n$  – число послідовно з'єднаних тягових двигунів;

$k$  – число паралельних гілок тягових двигунів;

$\mathcal{Q}_{max}$  – максимальна швидкість рухомого складу,  $км/год$ ;

тип рухомого складу (трамвай, тролейбус);

спосіб збудження тягових двигунів (змішане, послідовне, паралельне).

Исходные данные		Исходные данные	
пн	1720 .об/мин	Тип ПС	Трамвай
пmax	3910 .об/мин	Возбуждение	сериесное
dPст	336 .Вт	Rc	0,042 .Ом
dPтщ	825 .Вт	Rш	0 .Ом
dPп	100,2 .Вт	Компенсационная обмотка	Нет
dPвент	363,347 .Вт	n	2
Da	0,255 .м	k	2
Dk	0,7 .м	Vmax	70 .км/ч
мя	7,2		
Mпс0	17000 .кг		
Mпс	26000 .кг		
Гаммн	0,2		
W0	50 Н/м		
Psi	0,15		

Рис. Д.16. Панель формування вхідних даних

### Настроювання режимів роботи

Для виконання досліджень необхідно задати кількість точок, значення струму якоря магнітного потоку, для яких необхідно розрахувати характеристики на ободі колеса (рис. Д.17). При розрахунках можливо використовувати закладені характеристики додаткових

втрат (рис. Д.18), втрат у передачі (рис. Д.19), характеристики намагнічування (рис. Д.20), або занести необхідні, користуючись відповідними опціями панелі рис. Д.16.

Хар. на ободі колеса | К расчёту доб. потерь | Хар. потерь в передаче | Магнитная хар. |

**Значения рассчитываемых точек характеристик на ободу колеса** Изменить

№ точки	1	2	3	4	5	6
$l_a/l_{an}$	0,300	0,500	0,750	1,000	1,500	2,000

Nt (max 99):  По умолчанию

---

**Значения потоков при которых пересчитываются характеристики на ободу колеса** Изменить

№	1	2	3
$\Phi/\Phi_n$	0,500	0,750	1,000

Nt (max 10):  По умолчанию

Рис. Д.17. Формування розрахункових точок

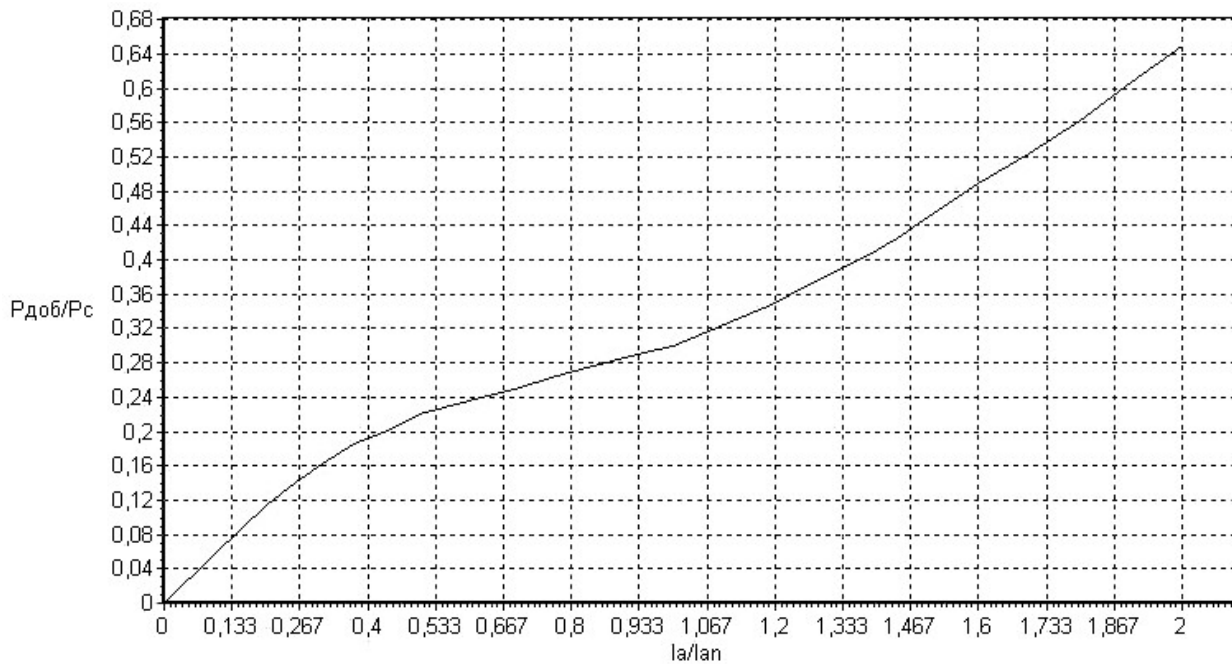
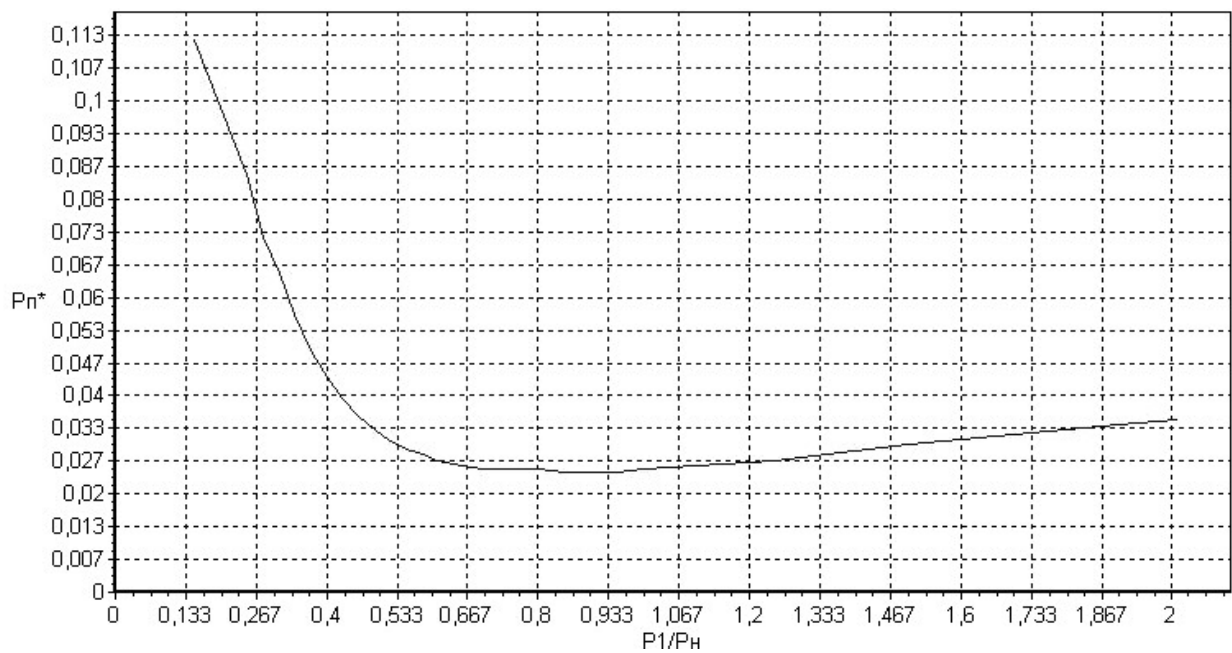
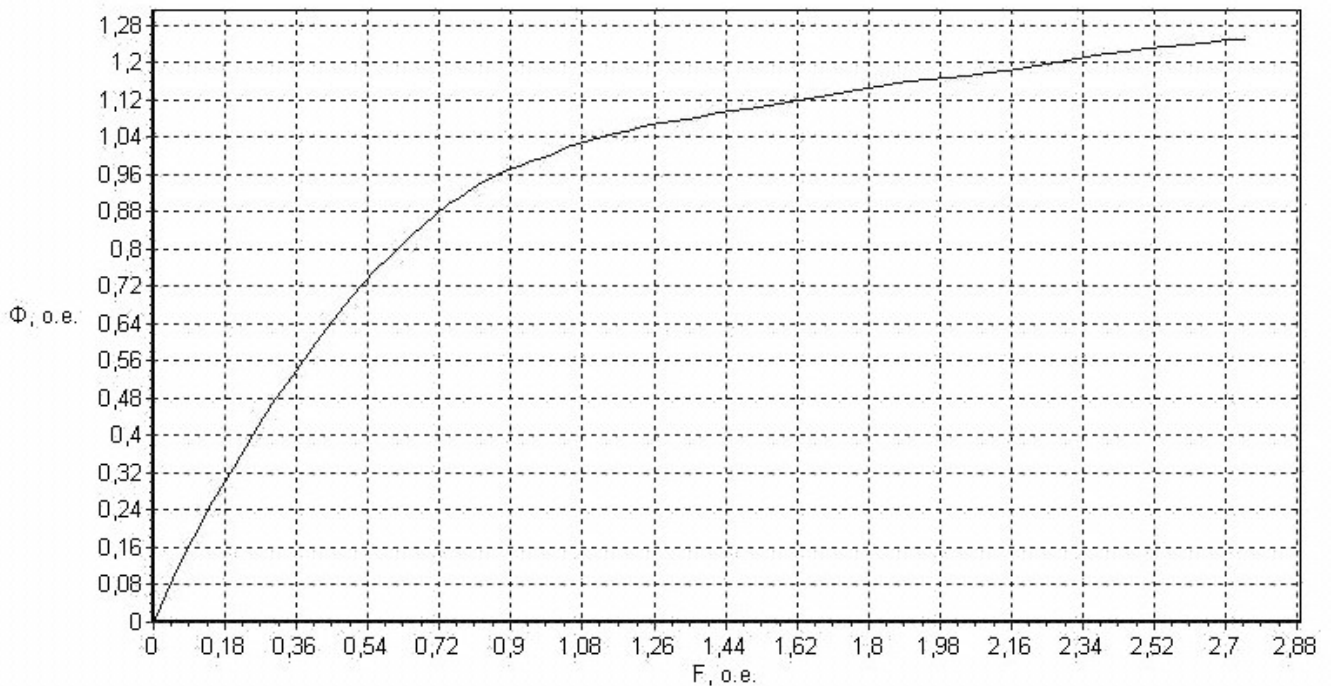


Рис. Д.18. Додаткові втрати



*Рис. Д.19. Втрати в передачі*



*Рис. Д.20. Характеристика намагнічування*

***Розрахунок характеристик на ободі колеса***

Результати розрахунку характеристик на ободі колеса формуються у вигляді трьох таблиць для відповідних значень магнітного потоку (рис. Д.21) і характеристик (рис.



Д.22, Д.23, Д.24).

Характеристики при  $\Phi = 0,5 \cdot \Phi_n$  | Характеристики при  $\Phi = 0,75 \cdot \Phi_n$  | Характеристики при  $\Phi = 1 \cdot \Phi_n$

$I_a$ , о.е.	0.300	0.500	0.750	1.000	1.500	2.000
$I_a$ , А	50.100	83.500	125.250	167.000	250.500	334.000
$E_a$ , В	0,0	0,0	0,0	275,6	264,4	253,2
$F_z$ , А	0,0	0,0	0,0	1252,6	1878,9	2505,2
$F_{qd}$ , А	0,0	0,0	0,0	128,2	192,3	256,4
$F_{sum}$ , А	0,0	0,0	0,0	1124,4	1686,6	2248,8
$\Phi$ , Вб	0,0000	0,0000	0,0000	0,0073	0,0101	0,0121
$n$ , об/мин	0,0	0,0	0,0	3443,2	2391,4	1894,6
$dP_z$ , Вт	0,0	0,0	0,0	3742,7	8421,1	14970,8
$dP_c$ , Вт	0,0	0,0	0,0	235,1	259,6	267,5
$dP_{тщ} + dP_n$	0,0	0,0	0,0	1852,1	1286,4	1019,1
$dP_{вент}$ , Вт	0,0	0,0	0,0	2915,0	976,6	485,6
$dP_{доб}$ , Вт	0,0	0,0	0,0	70,5	116,8	173,9
$sumdP$ , Вт	0,0	0,0	0,0	9149,4	11561,5	17584,9
$P_2$ , Вт	0,0	0,0	0,0	40950,6	63588,5	82615,1
КПДд, о.е.	0,0000	0,0000	0,0000	0,8174	0,8462	0,8245
$M$ , Нм	0,0	0,0	0,0	113,6	253,9	416,4
$V_k$ , км/час	0,0	0,0	0,0	63,3	43,9	34,8
$dP_n^*$ , %	0,0000	0,0000	0,0000	2,5680	3,1870	3,6970
КПДк, о.е.	0,0000	0,0000	0,0000	79,1697	81,4285	78,7532
$F_k$ , Н	0,0	0,0	0,0	1849,8	4253,7	6746,4

Save V,F,K=f(i)

Рис. Д.21. Панель результатів розрахунків характеристик

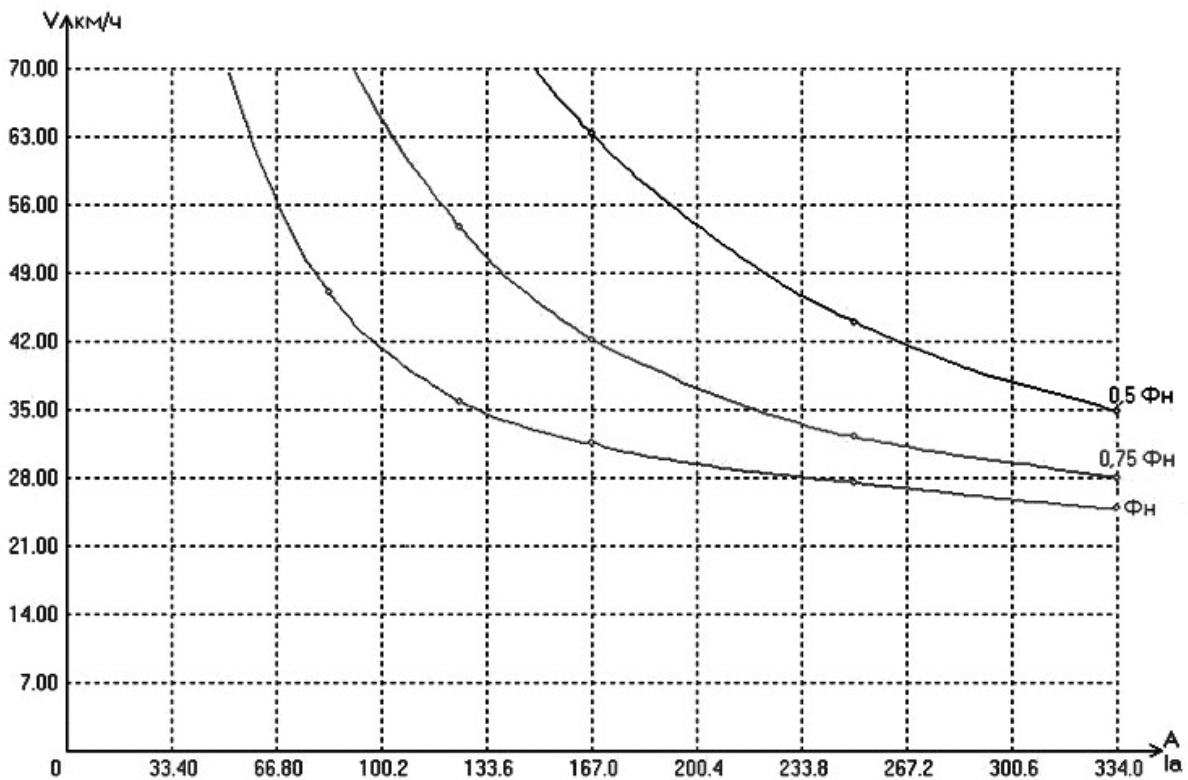


Рис. Д.22. Зміна швидкості на ободі колеса –  $\vartheta_k = \varphi(I_a)$

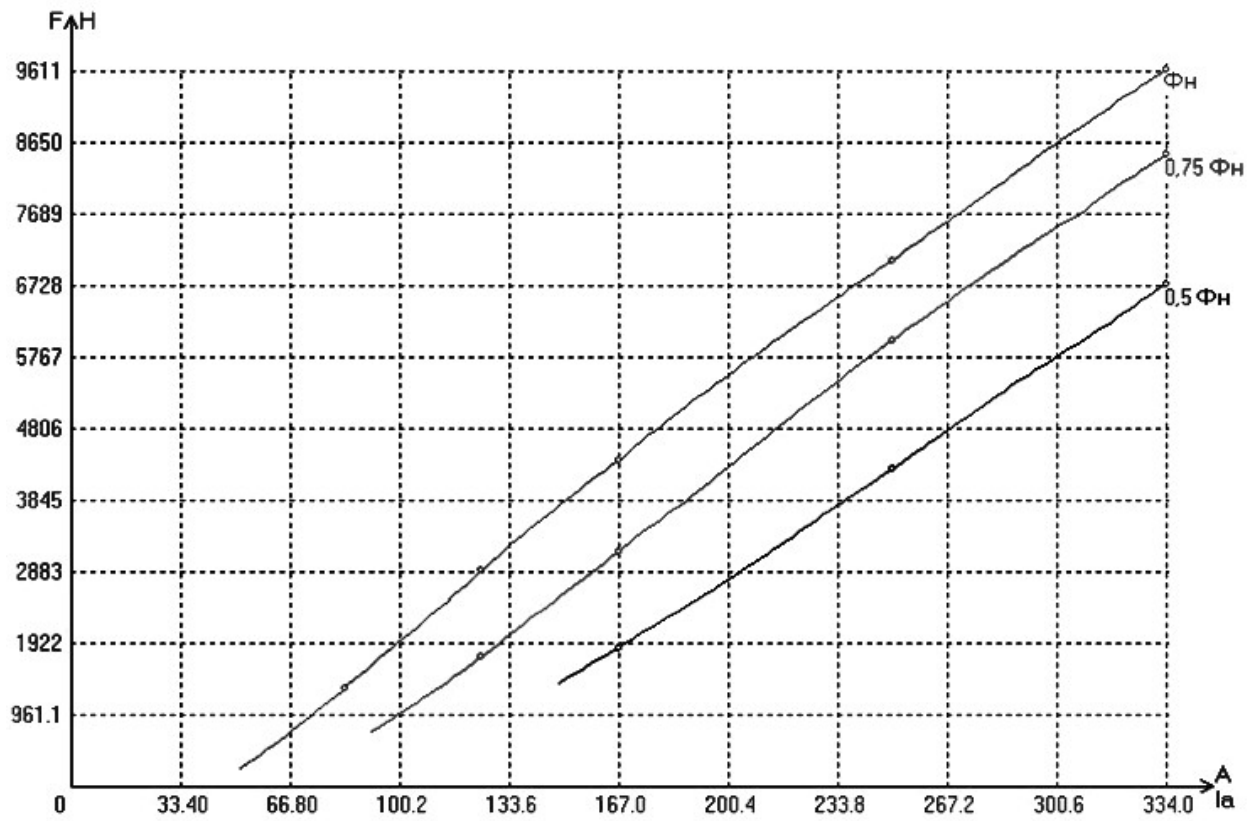


Рис. Д.23. Зміна тягового зусилля –  $F_k = \varphi(I_a)$

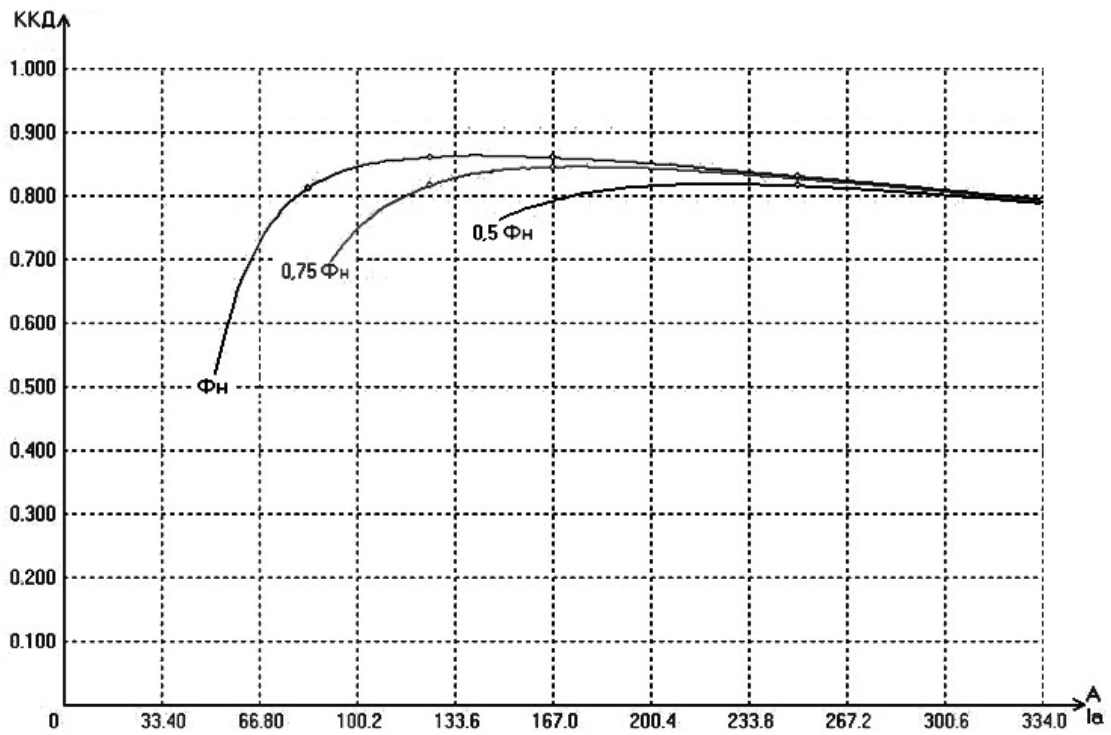
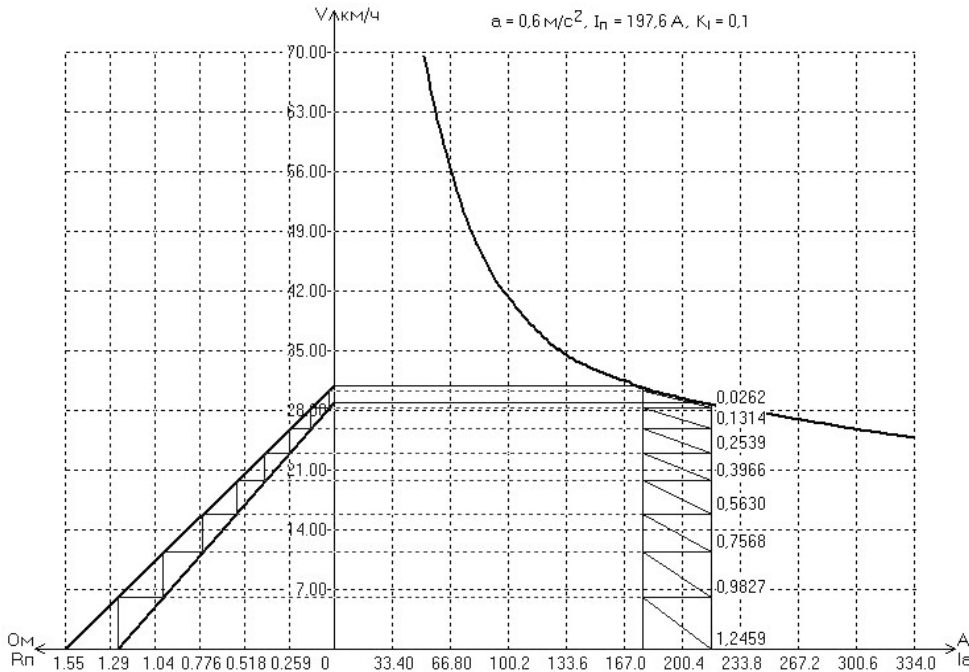


Рис. Д.24. Зміна ККД ТЕД –  $\eta_k = \varphi(I_a)$

**Розрахунок діаграми реостатного пуску  $\mathcal{G} = \varphi(R_{\Pi})$ ,  $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$**

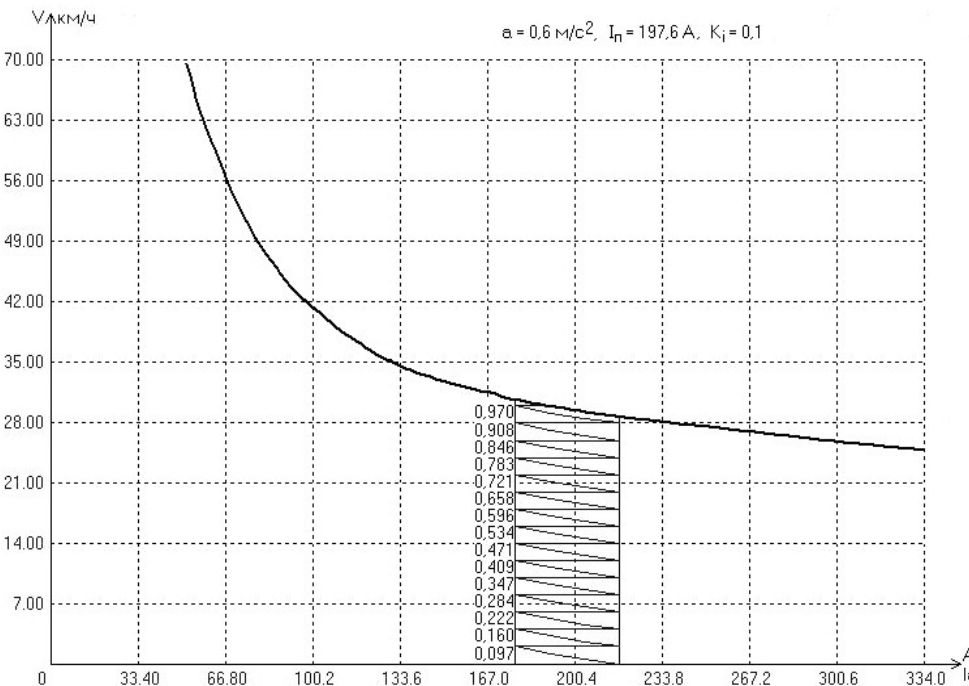
Можна змінювати початкове прискорення транспортного засобу ( $a$ ) та коефіцієнт пульсації струму якоря ( $K_i$ ).



*Рис. Д.25.  
Ступенева  
діаграма пуску  
 $\mathcal{G} = \varphi(R_{\Pi})$ ,  
 $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$*

**Розрахунок діаграми пуску при живленні від регулятора напруги  $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$**

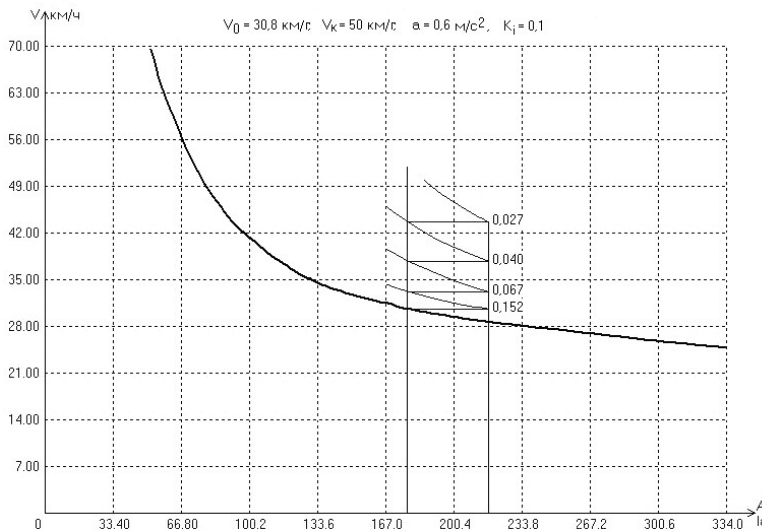
Користувач може змінювати початкове прискорення транспортного засобу ( $a$ ) та коефіцієнт пульсації струму якоря ( $K_i$ ).



*Рис. Д.26.  
Діаграма  
пуску  
регулюванням  
напруги  
 $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$   
при  $U_a = \text{var}$*

**Розрахунки діаграми розгону  $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$ .**

Користувач може змінювати початкове прискорення транспортного засобу ( $a$ ), коефіцієнт пульсації струму якоря ( $K_i$ ), початкову ( $\mathcal{G}_0$ ) та кінцеву ( $\mathcal{G}_K$ ) швидкість розгону.

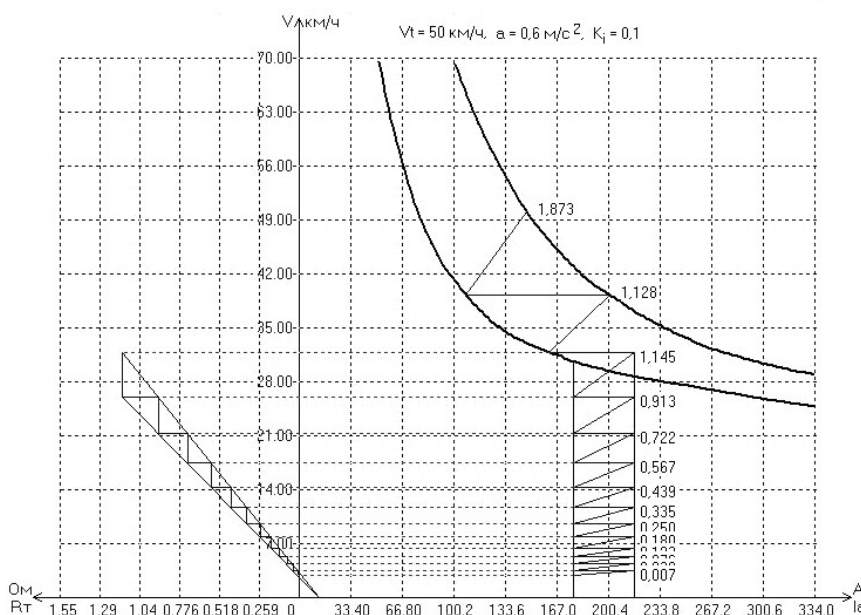


*Рис. Д.27.  
Графік  
регулювання  
частоти  
обертання*

**Розрахунок діаграми реостатного гальмування**

$\mathcal{G} = \varphi(R_{II}), \mathcal{G} = \varphi(I_a)$ .

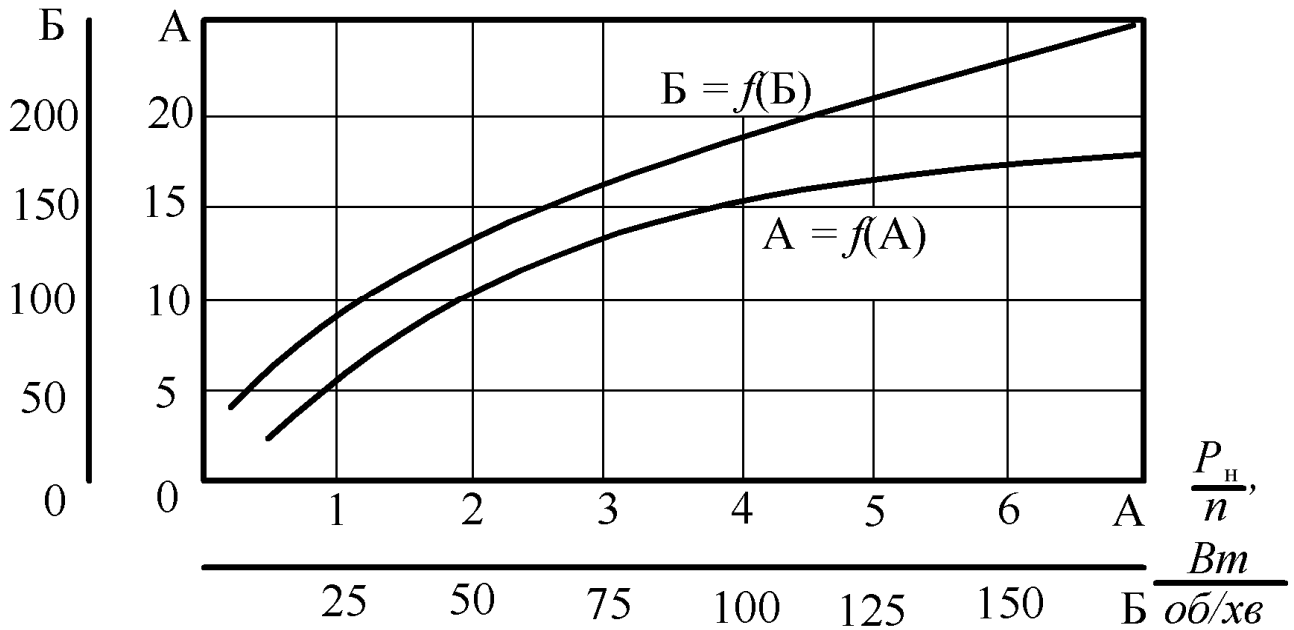
Користувач може змінювати початкове гальмування транспортного засобу ( $a$ ), коефіцієнт пульсації струму якоря ( $K_i$ ), початкову швидкість гальмування ( $\mathcal{G}_t$ ).



*Рис. Д.28.  
Діаграма  
гальмування  
 $\mathcal{G} = \varphi(R_{II}),$   
 $\mathcal{G} = \varphi(I_a)$*

Показники двигунів із само вентиляцією (серія 2П)

Витрати міді, кг



Витрати сталі, кг

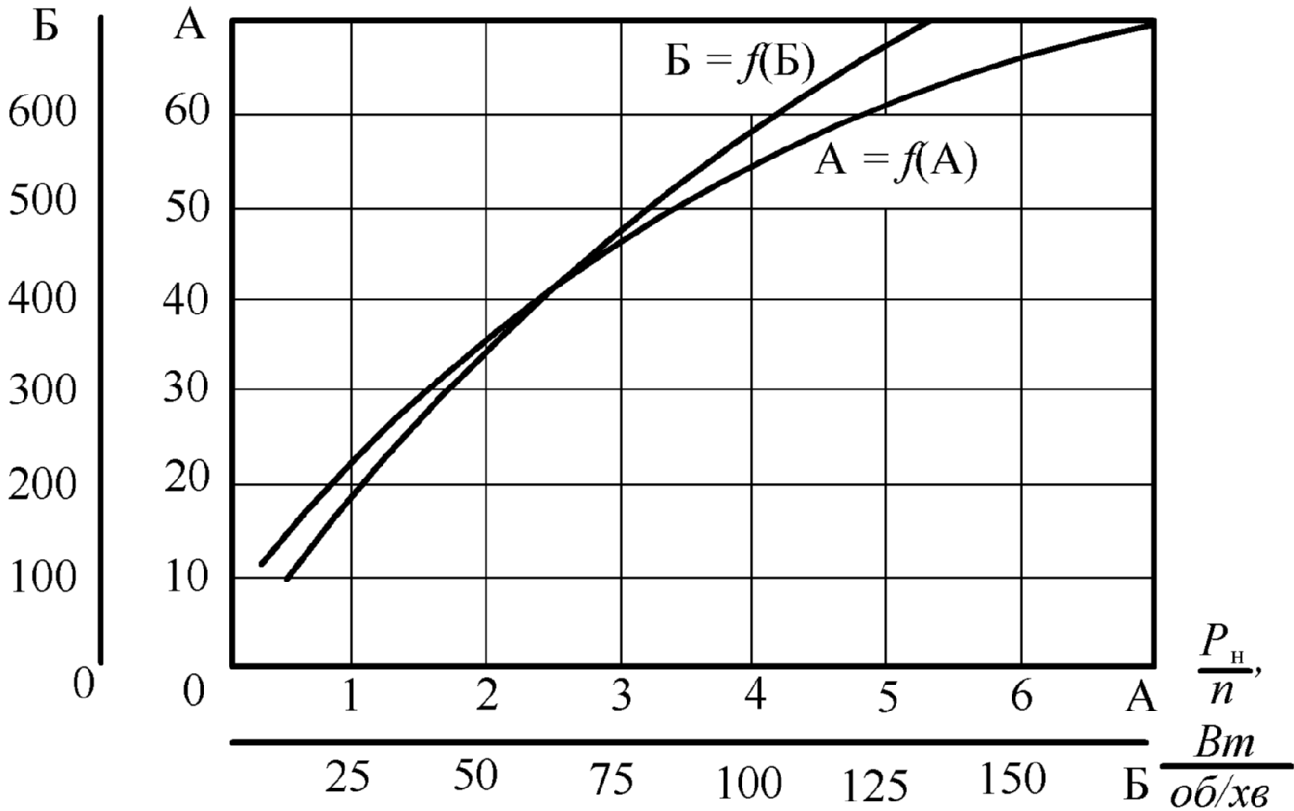


Рис. Е.1. Показники витрати конструктивних матеріалів

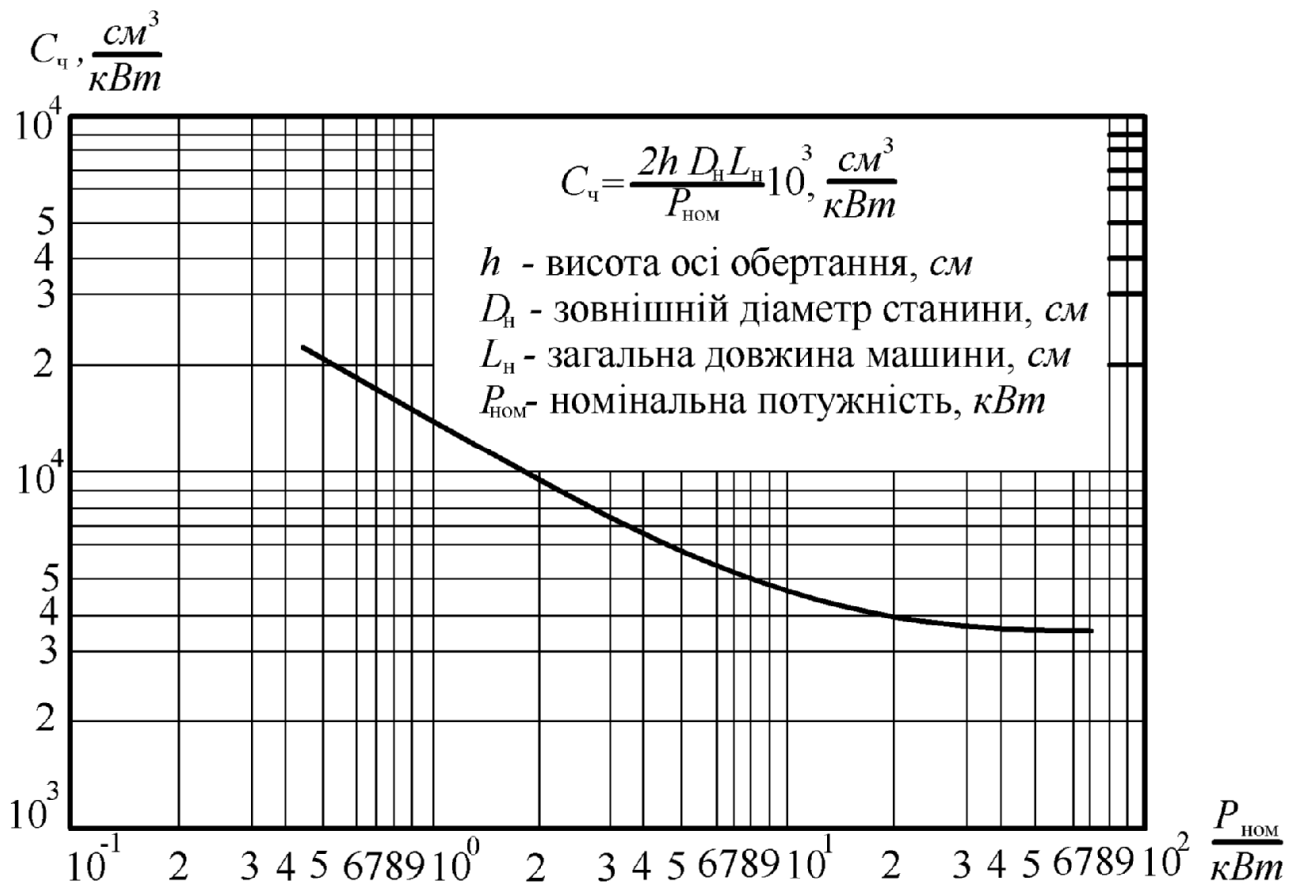


Рис. Е.2. Показники використання конструктивного об'єму

## Оформлення результатів проектування

Таблиця Ж.1

## Зведення основних розрахункових даних машини

$P_H =$ кВт	$V_H =$ В	$n_H =$ об/хв	$n_{max}/n_H =$
$r_o =$ мм	$D_a =$ мм	$D_H =$ мм	$\delta =$ мм
$I_H =$ А	$p =$	$a =$	Тип ОЯ
$=$	$\Pi =$	$\kappa =$	$U_K =$ В
$U_{Kmax} =$ В	$D_K =$ мм	$t_K =$ мм	$\delta =$ мм
Обмотки			
Обмотка	Витків на полюс	Густина струму	Розміри й марка проводу
Якоря			
Паралельна ОЗ			
Послідовна ОЗ			
ОДП			
КО			
Електромагнітні навантаження			
$B_\delta =$ Тл	$B_{zmax} =$ Тл	$B_r =$ Тл	$B_c =$ Тл
$B_j =$ Тл	$B_{zk} =$ Тл	$=$ А/м	$t \cdot j_a =$ А <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
Втрати при номінальному навантаженні, Вт			
$\Delta p_{ст} =$	$\Sigma \Delta p_{ea} =$	$\Delta p_{ec} =$	$\Delta p_{еш} =$
$\Delta p_{eко} =$	$\Delta p_{ед} =$	$\Delta p_{eкол} =$	$p_{ещ} =$
$\Delta p_{мех} =$	$\Delta p_{дод} =$	$\Sigma \Delta p =$	$\eta =$ %
Перегрів обмоток, °С			
$\theta_{оя} =$	$\theta_{ста} =$	$\theta_{кол} =$	$\theta_d =$
$\theta_{ш} =$	$\theta_c =$	$\theta_{ко} =$	$\theta_{пов} =$

Курсовий проект оформлюється у вигляді розрахунково-пояснювальної записки й графічної частини.

### ***Ж.1. Розрахунково-пояснювальна записка***

Пояснювальна записка оформляється в редакторі Microsoft Word шрифтом Times New Roman, 14 pt на листах формату А4 з рамкою й штампом для текстових документів. Формули набираються в редакторі формул MathType, графіки - в Microsoft Excel, ескізи й рисунки - у графічних редакторах.

Пояснювальна записка повинна мати зміст із номерами сторінок. Сторінки записки повинні мати суцільну нумерацію, включаючи титульний лист, реферат (на них номери не проставляють) й додатки.

Нумерація рисунків і таблиць складається з номера розділу й номера рисунку (таблиці) у розділі – Рис. 2.1, Таблиця 5.1 і т. і.

За даними виконаної роботи необхідно заповнити підсумкову таблицю (табл. Ж.1), яка розташовується після завдання на проектування.

### ***Структура розрахунково-пояснювальної записки***

• Титульний лист. • Реферат. • Зміст. • Вступ. • Завдання на проектування. • Підсумкова таблиця результатів розрахунку (табл. Ж.1). • Попередній розрахунок довжини якоря. • Корегування електромагнітних навантажень. • Вибір типу обмотки якоря. • Розрахунок числа провідників ОЯ. • Розрахунок геометрії зубцевої зони. • Розрахунок компенсаційної обмотки. • Розрахунок повітряного зазору. • Протокол розрахунку магнітного кола на ПК. • Протокол і результати розрахунку на ПК характеристики неробочого ходу. • Аналіз магнітного поля на перекидання. • Розрахунок дії поля якоря. • Розрахунок МРС збудження й обмоток збудження. • Розрахунок додаткових полюсів. • Попередній розрахунок двигуна на ПК і протокол роботи. • Розміщення обмоток полюсів у вікні машини. • Розрахунок втрат і ККД. • Остаточний розрахунок двигуна на ПК і протокол роботи. • Розрахунок робочих характеристики. • Розрахунок найбільшої частоти обертання. • Розрахунок регулювальних характеристик при збільшенні частоти обертання. • Розрахунок регулювальних характеристик при зменшенні частоти обертання. • Розрахунок природніх і штучних характеристик. • Аналіз магнітного поля при перевантаженні двигуна. • Розрахунок на ПК електромеханічних та механічних характеристик. • Виконання на ПК проектних досліджень. • Розрахунок економічних показників спроектованої машини. • Тепловий і вентиляційний розрахунки. • Конструктивна розробка машини й механічні розрахунки. • Порівняння показників спроектованого й серійного ДПС. • Висновки. • Перелік використаної літератури. • Додатки. • Специфікації.

### ***Ж.2. Графічна частина проекту***

Графічна частина складається із трьох листів креслення формату А0. При виборі масштабу потрібно прагнути до максимального заповнення листа.

Креслення загального виду машини (поздовжній і поперечний розрізи) виконується на одному листі в графічному редакторі. За основу необхідно прийняти креслення аналогічної машини з альбому й погодити його з керівником проекту.



Поздовжній розріз верхньої частини машини виконується через вентиляційні канали якоря й колектор. Праворуч від вертикалі дається розріз головного полюса, ліворуч - додаткового. Поперечний розріз робиться в правій верхній чверті через середину якоря, а в лівій чверті - через колектор і щіткотримач, нижня половина виконується без розрізів.

На кресленні повинні бути проставлені розміри осердя якоря, колектора, а також установочно-приєднувальні розміри.

Специфікацію встановленої форми виконують на окремих листах формату А4. У специфікацію потрібно включити основні деталі машини: листи якоря, листи полюса, обмотувальні провідники, ізоляцію обмотки, станину, підшипникові щити, вал, натискні шайби якоря й колектора, пластини й ізоляційні деталі колектора, траверсу, щіткотримач, щітку й ін.

На другому листі формату А0 зображуються вузли (деталі) запроектованої машини.

Третій лист графічної частини - характеристики запроектованого двигуна, погоджені з керівником проекту.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдберг О. Б. Проектирование электрических машин / О. Б. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М.: Высш. шк., 1984. – 432 с. : ил.
2. Гурин Я. С. Проектирование серий электрических машин / Я. С. Гурин, Б. И. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – 480 с. : ил.
3. Гурин Я. С. Проектирование машин постоянного тока / Я. С. Гурин, М. Н. Курочкин. – М.: Энергия, 1965. – 280 с. : ил.
4. Ефремов И. С. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование): учеб. пособие для вузов / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высш. шк., 1981. – Ч. 1. – 293 с. : ил.
5. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин / М. М. Кацман. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с. : ил.
6. Кожевников В. А. Развитие конструкции и теории машин постоянного тока / В. А. Кожевников, И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 145 с. : ил.
7. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1979. – 534 с. : ил.
8. Основи автоматизованого проектування електричних машин: конспект лекцій / укл. В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2008. – 102 с.
9. Петров Г. Н. Электрические машины / Г. Н. Петров. – Ч. III: Машины постоянного тока. – М.: Энергия, 1968. – 223 с. : ил.
10. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с. : ил.
11. Рабинович И. Н. Проектирование электрических машин постоянного тока / И. Н. Рабинович, И. Г. Шубов. – Л.: Энергия, 1967. – 504 с. : ил.
12. Сергеев П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. – М.: Энергия, 1969. – 632 с. : ил.
13. Тягові електричні машини: конспект лекцій / укл. В.П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2003. – 100 с.
14. Белікова Л. Я. Електричні машини: навч посіб. для студ. вищ. нівч. закладів / Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2011. – 480 с.

## ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВД – вхідні дані на проектування
- ДП – додатковий полюс
- ДПС – двигун постійного струму
- ел. град. – електричний градус
- ЕМ – електрична машина
- ЕРС – електрорушійна сила
- ІС – виконання ЕМ за способом охолодження
- ІР – виконання ЕМ за способом захисту
- ІМ – виконання ЕМ за способом монтажу
- КО – компенсаційна обмотка
- МРС – магніторушійна сила
- МПС – машина постійного струму
- ОЗ – обмотка збудження
- ОДП – обмотка додаткових полюсів
- ОП – ослаблене магнітне поле
- ОЯ – обмотка якоря
- ПК – персональний комп'ютер
- ПО – петльова обмотка якоря
- ПП – повне магнітне поле
- РС – електрорухомий склад
- ТЕД – тягова електрична машина
- ТЗ – технічне завдання
- ТІ – температурний індекс
- ТЕД – тяговий електродвигун
- ХО – хвильова обмотка якоря
- ХНХ – характеристика неробочого ходу

# АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

## А

Аналіз магнітного поля при  
перевантаженні ДПС  
Аналіз ТЕД на ПЕОМ

## В

Вентиляційний розрахунок  
Визначення головних розмірів 53  
Втрати  
– електричні  
– магнітні  
– механічні  
– додаткові при НХ  
– додаткові при навантаженні

## Г

Густина струму ОЯ

## Д

Додатковий полюс  
– геометрія ДП  
– індукція у зазорі  
– магнітне коло  
– МРС  
– обмотка ДП  
– повітряний зазор

## З

Завдання на проектування  
Запитання на захист проекту  
Зрівнювальні з'єднання

## Е

Економічні показники  
Електротехнічні матеріали  
– ізоляційні  
– провідникові  
– конструкційні  
Електромагнітні навантаження

## І

Індукція в зазорі  
К  
ККД  
Компенсаційна обмотка

## Л

Лінійне навантаження

## М

Магнітне коло  
– повітряний зазор  
– зубцевий шар  
– спинка якоря  
– головний полюс  
– станина  
Магніторушійна сила  
– повітряний зазор  
– зубцевий шар  
– спинка якоря  
– головний полюс  
– станина  
Механічні розрахунки  
– бандажі  
– колектор  
– клин  
– кріплення полюсів  
Механічні характеристика  
– природна  
– штучна

## Н

Настановні розміри МРС

## О

Обмотки якоря  
– аналіз властивостей ОЯ  
– комбіновані  
– прості петльові

- прості хвильові
- **несиметричні хвильові**
- складні петльові
- складні хвильові

**Обмотки збудження**

- МРС обмоток
- опір обмоток

**Оформлення результатів проектування**

**П**

**Пази якоря**

- відкритий
- напівзакритий

**Перевірка якості розрахунку ДП**

**Перекидання магнітного поля**

**Повітряний зазор**

- рівномірний
- ексцентричний
- клиноподібний
- частково розбіжний

**Показники ДПС**

**Постійні часу обмоток**

**Приклад розрахунку**

**Р**

**Реактивна ЕРС**

**Регульовальна здатність ДПС**

**Регулювання частоти обертання**

- вверх від номінальної
- вниз від номінальної

**Розрахунок ДПС на ПЕОМ**

- вхідні дані
- результати розрахунку

**Розміщення обмоток у вікні**

**Розміри обмотувальних проводів**

- круглого перерізу
- прямокутного перерізу
- гола шинна мідь

**Розрахунок**

- колекторних пластин
- провідників ОЯ

- числа пазів

**С**

**Стандартизація в електромашинобудуванні**

**Структура серій МПС**

- 2П
- 4П
- *4ПО, 4ПБ*
- *4ПФ*
- 5П
- порівняльні показники серій
- МПС великої потужності
- тягові двигуни

**Т**

**Таблиці намагнічування сталей**

**Температурний індекс**

**Тепловий розрахунок**

**Тягові електродвигуни**

- діаметр якоря
- параметри редуктора
- характеристики

**У**

**Урахування реакції якоря**

**Умова стійкої роботи**

**Ф**

**Фактор іскріння**

**Х**

**Характеристики при регулюванні**

- вверх від номінальної
- **вниз від номінальної**

**Щ**

**Щітки**

*Навчальне видання*

**Шевченко Володимир Петрович  
Бабушанов Олексій Вікторович**

# **Проектування машин постійного струму**

Навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів

Редактор І.В. Грачова  
Верстка Л. С. Мокра  
Обкладинка Л. С. Мокра

---

Підписано до друку 00.01.16. Формат 60\*84/16. Ум. друк. арк. 18,19  
Обл.-вид. арк. 15,92. Тираж 150 прим. Зам. № 1971.

---

Видавництво «Наука і техніка»  
(свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1196 від 15.01.2003 р.)  
65044, Україна, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, тел. (048) 734-86-40

---

Віддруковано в друкарні видавництва АО БАХВА  
(свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 145 від 11.08.2000 р.)  
65044, Україна, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, корп. 5  
тел./факс (048) 777-43-50, [www.bahva.com](http://www.bahva.com), e-mail: [mail@bahva.com](mailto:mail@bahva.com)