

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

М. Л. Глєбова, В. Б. Фінкельштейн, М. В. Чернявська

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

**«РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ»  
З ДИСЦИПЛІНИ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»**

*(для студентів усіх форм навчання напрямку  
6.050701 “Електротехніка та електротехнології”)*

Харків  
ХНАМГ  
2010

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи «Розрахунок трифазної синхронної машини» з дисципліни «Електричні машини» (для студентів усіх форм навчання напрямку 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”) / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: Глебова М. Л., Фінкельштейн В. Б., Чернявська М. В. – Х.: ХНАМГ, 2010 - 60 с.

Укладачі: М. Л. Глебова,  
В. Б. Фінкельштейн,  
М. В. Чернявська

Рецензент: проф., д.т.н. Сосков А. Г.

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,  
протокол №10 від 11.05.2010 р.

## Зміст

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ .....	5
2. ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ .....	6
2.1. Розрахункова електромагнітна потужність .....	7
2.2. Внутрішній діаметр розточення статора .....	8
2.3. Вибір електромагнітних навантажень .....	9
2.4. Розрахункова довжина машини .....	10
2.5. Відношення розрахункової довжини до полюсного розподілу .....	10
2.6. Вибір зовнішнього діаметра статора $D_a$ і діаметра розточення статора $D_i$ .....	11
2.7. Довжина осердя статора і число пакетів .....	12
3. ПРОЕКТУВАННЯ СТАТОРА .....	12
3.1. Вибір виконання обмотки .....	12
3.2. Число пазів статора .....	13
3.3. Перевірка умов симетрії обмотки при дробовому $q_1$ .....	14
3.4. Крок обмотки та обмотувальний коефіцієнт .....	14
3.5. Попереднє значення магнітного потоку статора .....	15
3.6. Попереднє значення числа витків у фазі .....	15
3.7. Число ефективних провідників у пазу статора .....	15
3.8. Уточнене значення числа витків фази обмотки .....	15
3.9. Уточнене значення магнітного потоку та перевірка індукції в повітряному зазорі .....	16
3.10. Номінальний струм фази статора .....	16
3.11. Перевірка лінійного навантаження .....	16
3.12. Вибір щільності струму для обмотки статора .....	16
3.13. Переріз ефективного провідника (витка обмотки) .....	17
3.14. Ширина паза .....	18
3.15. Вибір ізоляції обмотки .....	18
3.16. Ширина неізолюваної міді обмотки .....	18
3.17. Висота міді обмотки .....	19
3.18. Заповнення паза по ширині і висоті та визначення розмірів паза $b_{пл}$ і $h_{пл}$ відповідно .....	19
3.19. Перевірка величини індукції в розрахунковому перерізі зубця .....	20
3.20. Перевірка величини індукції у спинці статора .....	20
3.21. Уточнене значення щільності струму .....	20
3.22. Активний електричний опір обмотки статора .....	20
3.23. Активний опір у відносних одиницях .....	21
3.24. Індуктивний опір обмотки статора .....	22
3.25. Індуктивний опір обмотки статора у відносних одиницях .....	22
3.26. Вага обмотки статора .....	22
4. ПРОЕКТУВАННЯ ІНДУКТОРА .....	22
4.1. Полюс індуктора .....	22
4.2. Повітряний зазор під серединою полюса .....	23
4.3. Повітряний зазор по краях полюса .....	24

4.4. Ширина полюсного наконечника (башмака) .....	24
4.5. Попереднє значення коефіцієнта розсіювання полюса в режимі холостого ходу .....	24
4.6. Попереднє значення ширини осердя полюса .....	24
4.7. Попереднє значення висоти осердя полюса .....	25
4.8. Висота полюсного наконечника (башмака) .....	25
4.9. Радіус заокруглення полюсного наконечника .....	25
4.10. Попередні розміри і число стержнів демпферної клітки для генераторів і двигунів .....	26
4.11. Розміри корпусу (обода) індуктора .....	27
4.12. Розрахунок характеристики холостого ходу .....	27
4.13. Перевірка значення ВКЗ .....	31
4.14. Н.С. обмотки, що намагнічує, при номінальному навантаженні .....	32
4.15. Переріз провідника обмотки збудження .....	35
4.16. Попереднє значення числа витків обмотки збудження і розмірів міді .....	36
4.17. Уточнення розмірів обмотки збудження .....	36
4.18. Уточнення розрахунку характеристики холостого ходу і н.с. ....	37
4.19. Опір обмотки збудження в холодному стані (20°C) .....	37
4.20. Опір обмотки збудження в гарячому стані .....	37
4.21. Максимальний струм збудження .....	37
4.22. Струм збудження при номінальному навантаженні .....	37
4.23. Запас збудження .....	38
4.24. Вага міді обмотки збудження .....	38
4.25. Питома витрата міді обмотки збудження .....	38
5. ВТРАТИ І ККД У РЕЖИМІ НОРМАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ .....	38
5.1. Втрати в режимі холостого ходу .....	38
5.2. Електричні втрати в статорній обмотці (втрати в міді) .....	40
5.3. Додаткові втрати .....	40
5.4. Втрати на збудження .....	40
5.5. Повні втрати машини .....	40
5.6. Коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні .....	40
6. РОЗРАХУНОК НАГРІВАННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА Й ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ .....	41
6.1. Перевищення температури сталі статора над температурою навколишнього повітря .....	41
6.2. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора над температурою навколишнього повітря .....	42
6.3. Середній перепад температури в ізоляції обмотки статора .....	42
6.4. Середнє перевищення температури міді обмотки статора над температурою навколишнього повітря .....	42
Список літератури .....	60

Проектування електричних машин припускає поєднання знання процесів електромеханічного перетворення енергії, досвіду, накопиченого поколіннями інженерів-електромеханіків, і вміння застосувати обчислювальну техніку. При проектуванні потрібно враховувати відповідність техніко-економічних показників машин сучасному рівню, вимоги державних і галузевих стандартів, призначення та умови експлуатації, вартість активних і конструктивних матеріалів, ККД, технологію виробництва і надійність машин у роботі.

Вибір оптимального варіанта електричної машини обумовлюється критерієм, що визначається мінімумом вартості матеріалів, витрат на виготовлення та експлуатацію. Для цього треба вміти проводити електромагнітний, тепловий, механічний і економічний розрахунки машини.

Мета цих указівок – навчити студента розраховувати синхронну машину, застосовуючи традиційні засоби та способи обчислювальної техніки. Вони, природно, не містять всі дані, необхідні для розрахунку і конструювання електричної машини. Передбачається, що студент при виконанні розрахунково-графічної роботи (РГР) буде користуватися довідниками, каталогами та атласами креслень.

## **1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ**

1.1. Найменування РГР – «Розрахунок трифазної синхронної машини».

1.2. Мета РГР. Поглиблене вивчення матеріалу з розділів «Синхронні машини»; освоєння основних питань, особливостей і інженерної методики проектування синхронних машин; підготовка студента до самостійного вирішення інженерних задач при проектуванні, виготовленні та експлуатації синхронних машин.

1.3. Організація проектування. РГР студент виконує за індивідуальним завданням, яке видає керівник. Терміни виконання і захисту РГР вказані в навчальному графіку.

РГР по синхронних машинах складається з наступних частин: електромагнітного розрахунку, елементів теплового і вентиляційного розрахунку.

Розрахунково-пояснювальна записка до РГР має бути написана на стандартних аркушах білого паперу формату А4. У ній коротко з відповідними поясненнями викладають розрахункову частину проекту. До записки входять відповідні схеми, ескізи, графіки, виконані на міліметровому папері з дотриманням масштабу.

Компонують розрахунково-пояснювальну записку в такому порядку. Перший аркуш – титульний. Приклад його заповнення є на кафедрі. Другий аркуш записки – завдання на виконання РГР. Завдання затверджує і підписує керівник. Третій аркуш – «Зміст», в якому приводиться перелік основних розділів пояснювальної записки.

Далі наводиться вступ, а потім основні розділи електромагнітного розрахунку. Наприкінці записки йдуть висновок і список літератури.

1.5. Технічні умови задачі. Вихідні дані для проекту наступні:

номінальна потужність  $P_n$ , кВт;

номінальна лінійна напруга  $U_{1n}$ , В;

швидкість обертання  $n$ , об/хв;

коефіцієнт потужності  $\cos(\varphi)$ ;

частота  $f$ , Гц;

форма виконання.

Звичайно приймають стандартне значення частоти  $f = 50$  Гц. У завданні вказують захищене (менше закрите) виконання синхронної машини на двох стоякових підшипниках, установлюваних разом зі звареною станиною на фундаментній плиті. Система вентиляції – радіальна. Докладний опис конструкції наведено в [1, с.263-271].

## 2. ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

Головними розмірами синхронної машини є внутрішній діаметр статора  $D_i$  і його розрахункова довжина  $l_i$ .

Зв'язок між головними розмірами та обраними електромагнітними навантаженнями встановлюють за допомогою рівняння машинної постійної

$$C = \frac{6,1}{K_{обм} \cdot K_{\phi} \cdot B_{\delta \max} \cdot A \cdot \alpha_i} = \frac{D_i^2 \cdot l_i \cdot n}{S'_n}, \quad (1)$$

де  $K_{обм}$  – обмотувальний коефіцієнт, попередньо приймають  $= 0,92$ ;

$K_{\phi}$  – коефіцієнт форми поля,  $K_{\phi} = 1,14 \div 1,16$ ;

$B_{\delta \max}$  – максимальна індукція в повітряному зазорі, Тл;

$A$  – лінійне навантаження, А/м;

$\alpha_i$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau} \cdot K_{\alpha} = \alpha \cdot K_{\alpha}, \quad (2)$$

де  $b_p$  – довжина полюсної дуги, м;

$\tau$  – полюсний розподіл, м;

$K_{\alpha}$  – коефіцієнт, що залежить від відношення максимального повітряного зазору до мінімального, звичайно приймають  $\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5$ , тоді  $K_{\alpha} = 1$ ;

$\alpha_i = \alpha = 0,7 \div 0,74$  для  $2p > 4$ ;

$S'_n$  – розрахункова електромагнітна потужність, ВА.

## 2.1. Розрахункова електромагнітна потужність

Для синхронних двигунів (с.д.)

$$S'_n = \frac{K_e \cdot P_n}{\eta \cdot \cos \varphi},$$

для синхронних генераторів (с.г.)

$$S'_n = \frac{K_e \cdot P_n}{\cos \varphi},$$

(3)

де  $K_e$  – відношення ЕРС в якорі при номінальній напрузі до номінальної напруги;

для с.д.  $\cos \varphi = 0,9$  (що випереджає),  $K_e = 1,05 \div 1,06$ ;

для с.г.  $\cos \varphi = 0,8$  (що відстає),  $K_e = 1,08$ ;

$\eta$  = ККД попередньо вибираємо за табл. 1-3 (для серійних машин), у відносних одиницях.

Таблиця 1 - Значення ККД (%) синхронних генераторів при  $\cos \varphi = 0,8$  і  $U_{1H} = 400$  В

P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/хв			
	1000	600	500	375
125	-	-	90,5	-
160	-	91,3	-	-
200	-	-	91,9	-
250	93	92,6	-	-
315	-	-	92,7	-
400	-	-	-	92,6
500	-	-	-	93,4
630	-	-	-	93,8
8800	-	-	-	94,1

Таблиця 2 - Значення ККД (%) синхронних генераторів при  $\cos \varphi = 0,8$  і  $U_{1H} = 230$  В, 400 В,  $n = 1500$  об/хв

P <sub>н</sub> , кВт	η, %
4	80
8	82,2
12	86
16	87
20	87,5
30	88
50	90
60	90,5
100	92,5

Таблиця 3 - Значення ККД (%) для синхронних двигунів при  $\cos\phi = 0,9$  і номінальній напрузі 6000 В

$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	-	94,2	93,9	93,4	-	91,25	91,27	90,8
400	-	94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92
500	-	94,7	94,4	94,3	93,6	92,65	93	93
630	95	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,4	95	95	94,4	94,45
1250	-	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	-	96,3	96	95,85	95,85	95,77	95,2	95,0
2000	-	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	96,7	95,4
2500	-	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	-	97	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96
4000	-	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	-	97,3	97,2	97,09	97,07	-	-	-

## 2.2. Внутрішній діаметр розточення статора

Діаметр статора  $D_i$  визначають за залежністю  $D_i = f(S'_n)$  виконаних машин (рис.1, 2).

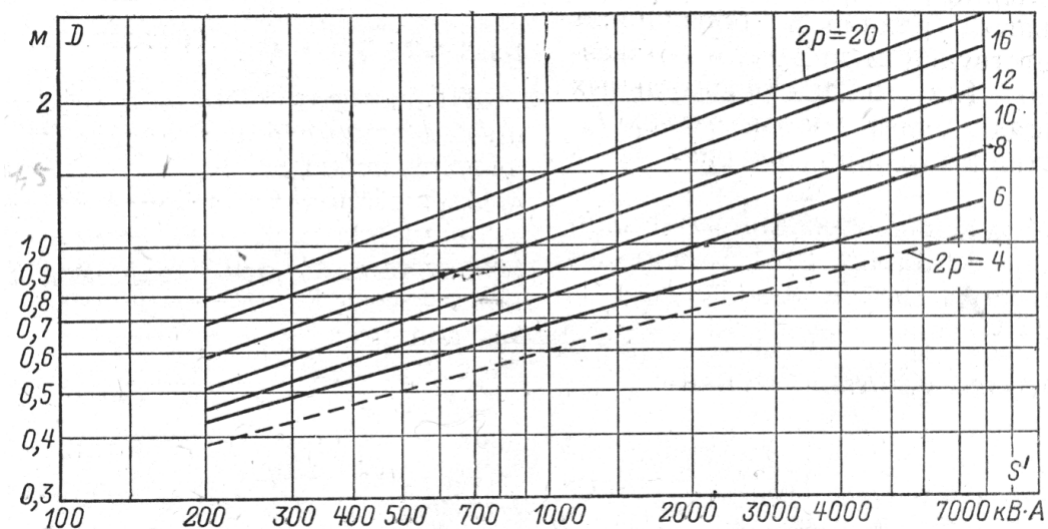


Рис. 1 - Залежність  $D_i = f(S'_n)$  при  $S'_n > 100$  кВ·А



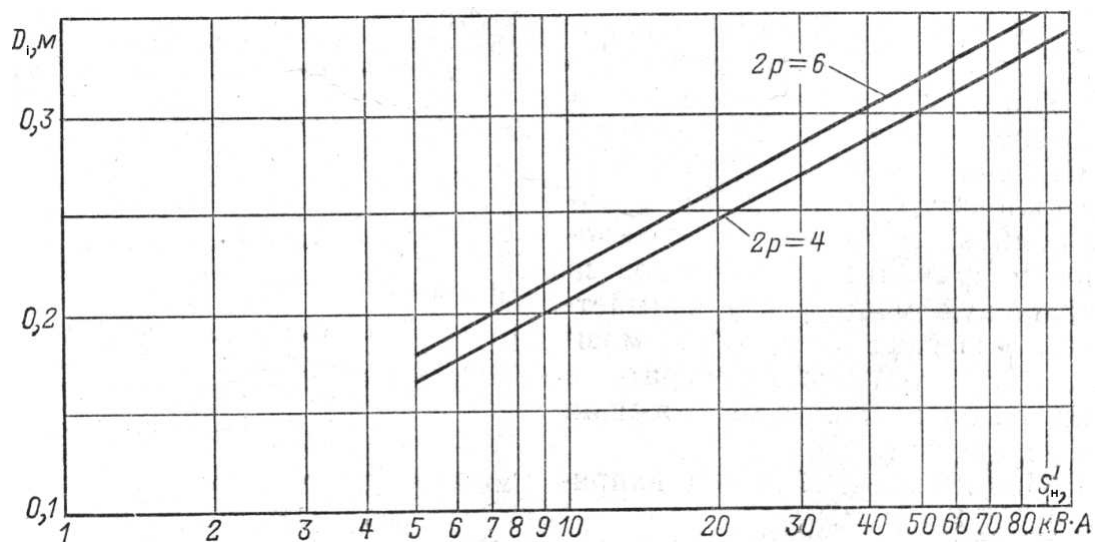


Рис. 2 - Залежність  $D_i=f(S'_n)$  при  $S'_n \leq 100$  кВА

Полюсний розподіл, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_i}{2p}, \quad (4)$$

де  $p$  – число пар полюсів,  $p = \frac{60f}{n}$ .

### 2.3. Вибір електромагнітних навантажень

Електромагнітні навантаження  $B_{\delta_{\max}}$  і А вибирають залежно від величини полюсного розподілу (рис.3, 4).

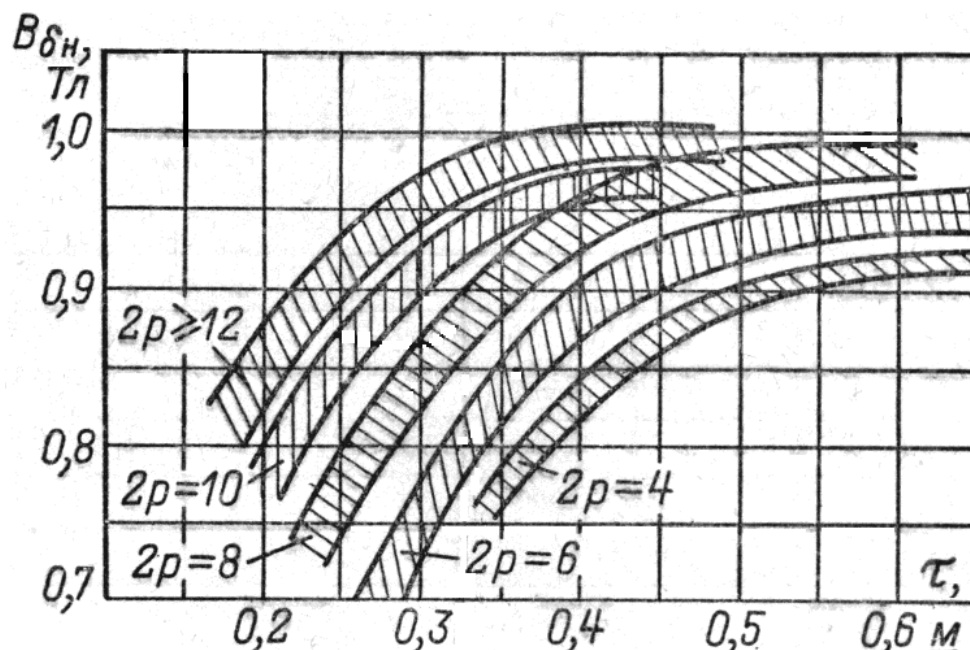


Рис. 3 - Залежність  $B_{\delta_{\max}}$  від  $\tau$  для синхронних машин потужністю  $P_n > 100$  кВт

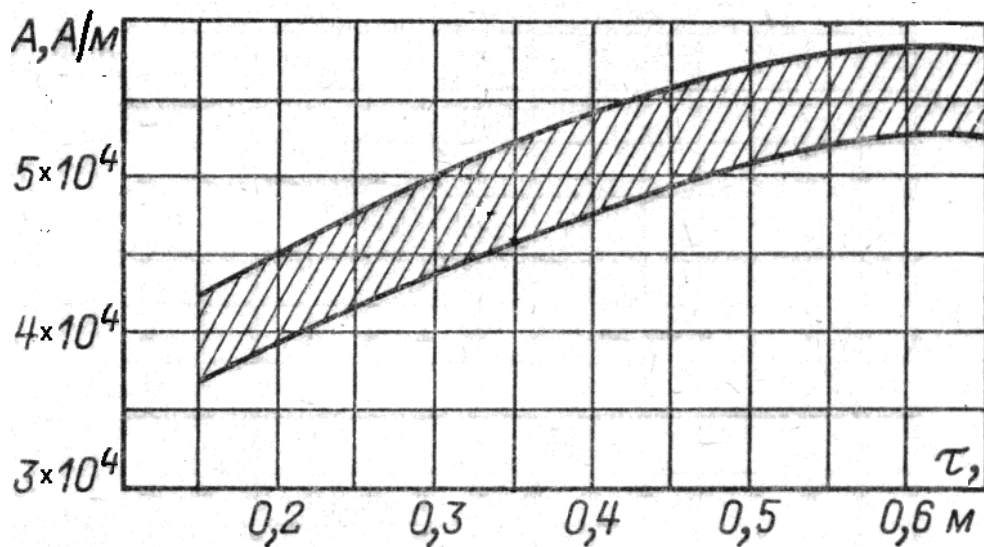


Рис. 4 - Залежність  $A$  від  $\tau$  для синхронних машин потужністю  $P_n > 100$  кВт

## 2.4. Розрахункова довжина машини

$$l_i = \frac{6,1 \cdot S'_n \cdot 10^3}{D_i^2 \cdot n \cdot K_{обм} \cdot K_\phi \cdot B_{\delta_{max}} \cdot A \cdot \alpha_i}, \text{ м.} \quad (5)$$

## 2.5. Відношення розрахункової довжини до полюсного розподілу

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau}. \quad (6)$$

Перевіряємо  $\lambda$  за рис. 5.

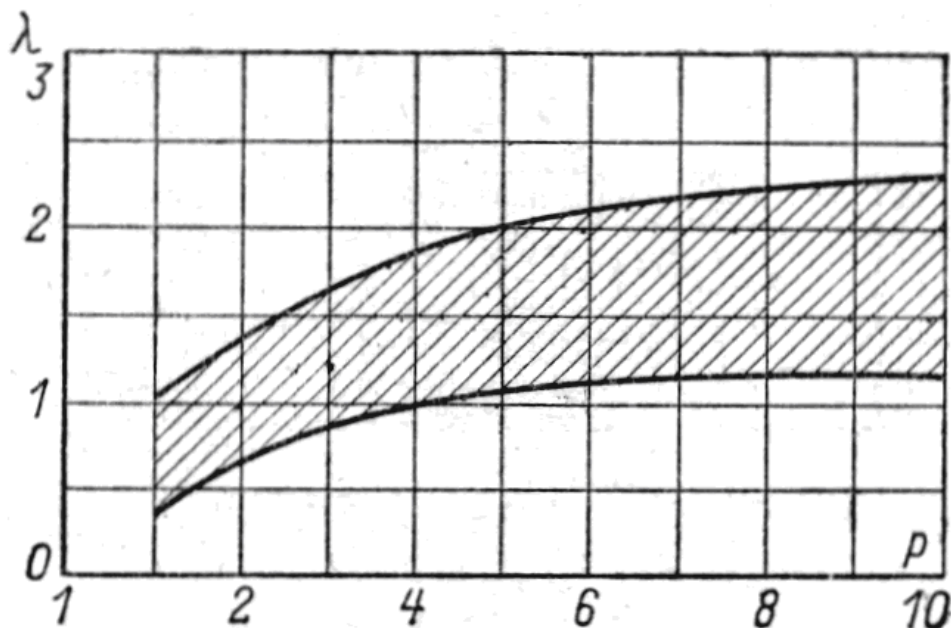


Рис. 5 - Значення  $\lambda = l_i / \tau$  залежно від числа пар

## 2.6. Вибір зовнішнього діаметра статора $D_a$ і діаметра розточення статора $D_i$

Попереднє значення  $D_i$  діаметра, м знаходимо за формулою

$$D_a = K_d \cdot D_i, \quad (7)$$

де  $K_d = f(p)$  беремо за табл. 4.

Таблиця 4 - Значення коефіцієнта  $K_d$  залежно від числа полюсів машини

$2p$	$K_d$
4	1,43÷1,52
6	1,40÷1,45
8	1,35÷1,40
10	1,30÷1,35
12	1,28÷1,33
16	1,22÷1,28

Зовнішні діаметри стандартизовані з умов найвигіднішого розкрою листів при штампуванні. Прийнята в даний час шкала зовнішніх діаметрів наведена в табл. 5.

Таблиця 5 - Значення нормалізованих діаметрів синхронних машин

Габарит	Зовнішній діаметр $D_a$ , мм	Висота осі оберт, мм
5	280	180
6	327	200
7	393	225
8	423	250
9	493	280
10	520	315
11	590	355
12	660	400
13	740	450
14	850	500
15	990	560
16	1180	630
17	1430	630
18	1730	630
19	2150	630
20	2600	630
21	3250	630

Зовнішній діаметр, обчислений за формулою (7) в міліметрах, округляємо до найближчого стандартного значення, переводимо в метри та уточнюємо діаметр розточення:

$$D_i = \frac{D_a}{K_d} . \quad (8)$$

Отримане значення (мм) округляємо до найближчого цілого числа, що закінчується цифрою 0 чи 5.

Уточнюємо значення полюсного розподілу, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} . \quad (9)$$

## **2.7. Довжина осердя статора і число пакетів**

Звичайно великі й середні синхронні машини захищеного виконання проектують з радіальною системою вентиляції, для здійснення якої осердя статора розбивають по довжині на окремі пакети, розділені вентиляційними каналами [1, с.277]. Звичайно довжина пакета  $l_{\text{пак}} = 0,04 \div 0,05$  м, ширина каналу  $b_{\text{к}} = 0,01$  м.

При наявності вентиляційних каналів довжина статора, м, буде більше розрахункової:

$$l_1 = (1,05 \div 1,08) l_i . \quad (10)$$

Довжину всіх пакетів беруть однаковою. У цьому разі число вентиляційних каналів

$$n_{\text{к}} = \frac{l_1 - l_{\text{пак}}}{l_{\text{пак}} + b_{\text{к}}} , \quad (11)$$

причому  $n_{\text{к}}$  округляємо до цілого числа.

Визначаємо число каналів, уточнюємо довжину пакета, м:

$$l_{\text{пак}} = \frac{l_1 - n_{\text{к}} \cdot b_{\text{к}}}{n_{\text{к}} + 1} . \quad (12)$$

## **3. ПРОЕКТУВАННЯ СТАТОРА**

### **3.1. Вибір виконання обмотки**

Для статора синхронних машин потужністю вище 200 кВт, проєктованих на високу напругу 3 кВ і вище, звичайно застосовують двошарову петлеву

обмотку з укороченим кроком, виконувану у вигляді твердих компаундованих секцій, що укладаються у відкриті пази прямокутної форми [1].

### 3.2. Число пазів статора

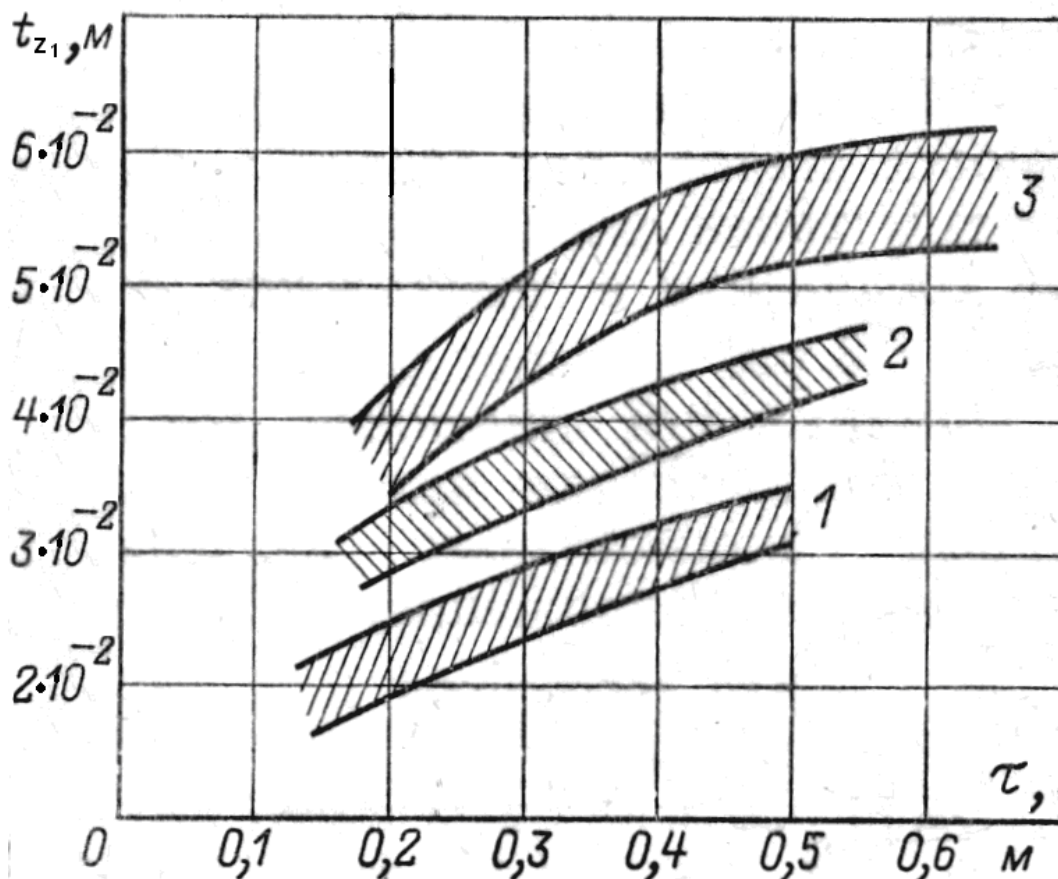
#### 3.2.1. Число пазів на полюс і фазу

Кожному значенню полюсного розподілу і напруги на затисках синхронної машини відповідають визначені оптимальні межі значення ширини паза і зубцевого розподілу статора в розточенні [1]. Оптимальні значення зубцевого розподілу в розточенні (рис. 6) і відповідно число пазів на полюс і фазу вибираємо за формулою

$$q_1 = \frac{\pi \cdot D_i}{2p \cdot m \cdot t_{z_1}}, \quad (13)$$

де  $m$  – число фаз,  $m = 3$ .

Обране число пазів на полюс і фазу при  $2p \leq 8$  може бути цілим чи дробовим, при  $2p > 8$  для генераторів з метою наближення форми кривої ЕРС до синусоїди бажано  $q$  брати дробовим.



*Рис. 6 - Межа змін зубцевого поділу  $t_{z_1}$  залежно від  $\tau$  полюсного поділу для синхронних машин: 1 - 13 та 14-го габаритів; 2 - 16-го та 17-го; 3 - 18-го та 21-го*

### 3.2.2. Число пазів статора

$$z_1 = 2p \cdot m \cdot q_1. \quad (14)$$

### 3.3. Перевірка умов симетрії обмотки при дробовому $q_1$

Обмотка статора буде симетричною, якщо числа  $z_1$  і  $q_1$  задовольняють умовам:

$$\frac{z_1}{t} = \frac{2p \cdot m \cdot q_1}{t} = \frac{2p \cdot m}{d} \text{ дорівнює цілому числу;} \quad (15)$$

$$\frac{2p}{a \cdot d} \text{ дорівнює цілому числу;} \quad (16)$$

де  $q_1 = b_1 + \frac{c}{d} = \frac{b \cdot d + c}{d} = \frac{b}{d}; \frac{c}{d}, \frac{t}{d}$  - дробі що не скорочуються;  
 $a$  – число паралельних гілок.

### 3.4. Крок обмотки та обмотувальний коефіцієнт

Обмотку бажано виконати з укороченням кроку порядку 0,8  $\tau$ .  
 Приймаємо

$$y_1 = \beta \cdot m \cdot q_1 = 0,8m \cdot q_1. \quad (17)$$

Округляємо значення  $y_1$  до найближчого цілого числа та уточнюємо значення укорочення і коефіцієнта укорочення кроку:

$$\beta = \frac{y_1}{m \cdot q_1}; \quad (18)$$

$$K_y = \sin \frac{\pi \cdot \beta}{2}. \quad (19)$$

Визначаємо коефіцієнт розподілу обмотки (для цілого значення  $q_1$ ):

$$K_p = \frac{\sin \frac{q_1 \cdot \alpha}{2}}{q_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (20)$$

де  $\alpha = \frac{2\pi \cdot p}{z_1}$ ,

і коефіцієнт обмотки  $K_{обм} = K_p \cdot K_y$ .

### **3.5. Попереднє значення магнітного потоку статора**

$$\Phi_1 = \alpha_i \cdot \tau \cdot l_1 \cdot B_{\delta \max}, \text{ Вб.} \quad (21)$$

### **3.6. Попереднє значення числа витків у фазі**

$$W_1 = \frac{0,47 U_{1\phi n} \cdot 10^{-2}}{\Phi_1 \cdot K_{обм}}, \quad (22)$$

де  $U_{1\phi n}$  – фазова напруга, звичайно вибираємо з'єднання обмотки Y, тоді

$$U_{1\phi n} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}}.$$

### **3.7. Число ефективних провідників у пазу статора**

(округляємо до цілого):

$$S_n = \frac{a \cdot W_1}{p \cdot q_1}, \quad (23)$$

де  $a$  – число паралельних гілок.

Для високовольтних синхронних машин (3÷6 кВ) потужністю менше 5000 кВА звичайно прагнуть брати  $a = 1$ .

Число ефективних провідників у пазу має бути цілим і бажано парним, також необхідно, щоб виконалася умова  $S_n \geq 4$ .

4. Якщо це неможливо виконати при  $a = 1$ , то розглядають варіанти  $a = 2$ ; 3 чи 4 з урахуванням зауважень підрозділу 3.3 за умовами симетрії обмотки.

Якщо при  $a \neq 1$  не вдається одержати  $S_n$  парним, то застосовують варіант з непарним значенням, причому в цьому разі необхідна перевірка можливості:

а) виконання симетричної обмотки з однаковим числом витків у кожній з трьох фаз;

б) укладання в пазах секцій з різним числом витків.

### **3.8. Уточнене значення числа витків фази обмотки**

$$W_1 = \frac{S_n \cdot p \cdot q_1}{a}. \quad (24)$$

### **3.9. Уточнене значення магнітного потоку та перевірка індукції в повітряному зазорі**

$$\Phi_1 = \frac{0,47U_{1\phi n} \cdot 10^{-2}}{W_1 \cdot K_{обм}}, \text{ Вб}; \quad (25)$$

$$B_{\delta \max} = \frac{\Phi_1}{Q_{\delta}}, \text{ Тл}; \quad (26)$$

$$Q_{\delta} = \alpha_i \cdot \tau \cdot l_i. \quad (27)$$

Отримане значення  $B_{\delta \max}$  не повинно відрізнятися більше ніж на (3÷8)% від значення, прийнятого на початку розрахунку. Якщо при перевірці значення  $B_{\delta \max}$  розбіжність більше, то необхідно змінити довжину машини  $l_i$  і відповідно перерахувати  $l_i$ ,  $n_k$ ,  $l_{\text{пак}}$ .

### **3.10. Номінальний струм фази статора**

$$I_{1\phi n} = \frac{S'_n \cdot 10^3}{3U_{1\phi n} \cdot K_e}, \quad (28)$$

де  $S'_n$  - розрахункова потужність, кВА;

$U_{1\phi n}$  - номінальна фазна напруга, В.

### **3.11. Перевірка лінійного навантаження**

$$A = \frac{I_{1\phi n} \cdot S_n}{a \cdot t_{z_1}}, \text{ А/м}, \quad (29)$$

де  $t_{z_1} = \frac{\pi \cdot D_i}{z_1}$  - зубцовий розподіл у розточенні.

Отримана при перевірці  $A$  не повинна відрізнятися більше ніж на 5÷10,% від величини, прийнятої на початку розрахунку.

Якщо при перевірці значення  $A$  розбіжність більше, то треба змінити число провідників у пазу  $S_n$  і відповідно перерахувати  $W_1$ ,  $\Phi$ ,  $B_{\delta \max}$ .

### **3.12. Вибір щільності струму для обмотки статора**

Припустиму щільність струму  $J_1$  визначають за добутком  $A \cdot J_1$ , що є характеристикою теплового навантаження обмотки і залежить від класу



нагрівостійкості застосовуваної ізоляції. На рис. 7 надана залежність  $A \cdot J_1 = f(\tau)$  для серійних синхронних машин з ізоляцією класу В. При застосуванні ізоляції класу F значення  $A \cdot J_1$ , наведені на рис. 7, можна збільшити на 25÷30%.

Значення щільності струму,  $\frac{A}{\text{м}^2}$ ,

$$J_1 = \frac{A \cdot J_1}{A}. \quad (30)$$

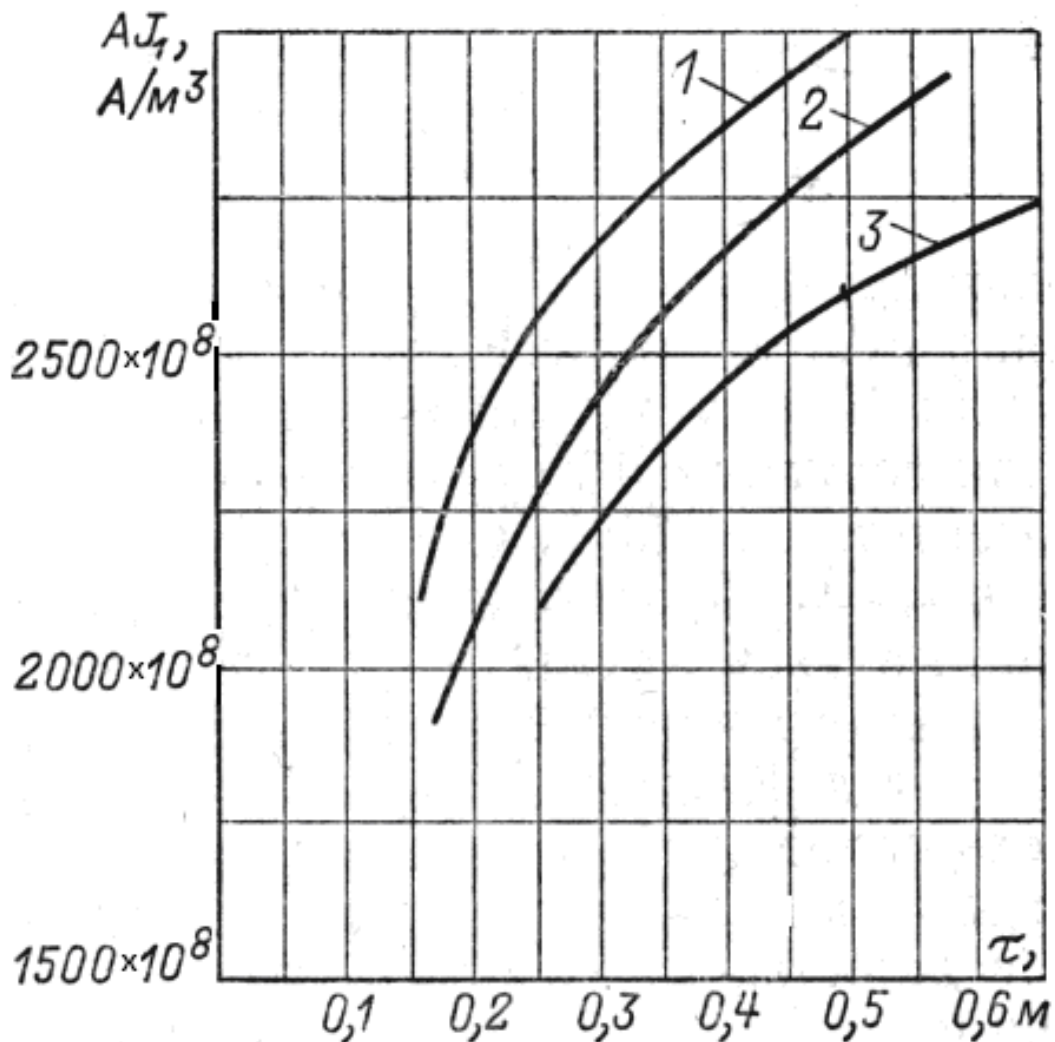


Рис. 7 - Залежність  $A \cdot J_1$  від  $\tau$  для синхронних машин: 1 - 13 і 14-го габаритів; 2 - 16-го і 17-го; 3 - 18-го і 21-го габаритів

### 3.13. Переріз ефективного провідника (витка обмотки)

$$Q_{1\text{эф}} = \frac{I_{1\text{фн}} \cdot 10^6}{a \cdot J_1}, \text{ мм}^2, \quad (31)$$

де  $a$  – число паралельних гілок.

### 3.14. Ширина паза

Ширину паза визначаємо, виходячи з умови, що максимальне значення індукції в розрахунковому перерізі зубця повинно знаходитися в межах  $B_{z_1/3} = 1,4 \div 1,65$  Тл.

Визначаємо зубцевий розподіл у розрахунковому перерізі, м,

$$t_{z_1/3} = \frac{\pi \left( D_i + \frac{2}{3} h_{n1} \right)}{z_1}. \quad (32)$$

Для попередніх розрахунків приймаємо висоту паза  $h_{n1} = 0,06 \div 0,08$  м.  
Попереднє значення ширини зубця в розрахунковому перерізі, м,

$$b_{z_1/3} = \frac{\Phi_1}{\alpha_i \cdot m \cdot q_1 \cdot l_{ef} \cdot B_{z_1/3}}, \quad (33)$$

де  $l_{ef}$  – ефективна довжина сталі, м,

$$l_{ef} = n_{пак} \cdot l_{пак} \cdot K_{зап} = l_{пак} \cdot (n_k + 1) \cdot K_{зап},$$

де  $K_{зап}$  – коефіцієнт заповнення, для лакованих листів сталі товщиною 0,5 мм,  $K_{зап} = 0,93$ .

Визначаємо попереднє значення ширини паза, м,

$$b_{n1} = t_{z_1/3} - b_{z_1/3}. \quad (34)$$

Ширина паза повинна знаходитися в межах  $(0,34 \div 0,5) t_{z_1/3}$ .

### 3.15. Вибір ізоляції обмотки

Ізоляцію обмотки вибираємо залежно від заданої лінійної напруги  $U_{лн}$ . У синхронних машинах від 100 кВт і вище застосовується термореактивна чи безупинна ізоляція класу нагрівостійкості В, специфікація якого надана в додатку 1.

### 3.16. Ширина неізольованої міді обмотки

$$b_{m1} = b_{n1} - (\Delta_{із} + \delta_{укл} + \delta_{із} + \delta_{шт} + \delta_{вит}), \text{ мм}, \quad (35)$$

де  $b_{n1}$  – ширина паза, мм;

$\Delta_{із}$  – товщина ізоляції секції (табл. 1.1-1.3);

$\delta_{укл}$  – допуск на укладання секції за шириною,  $\delta_{укл} = 0,3$  мм;

$\delta_{из}$  – товщина ізоляції обмотки проводу,  $\delta_{из} = 0,3$  мм;

$\delta_{шт}$  – допуск на штампування,  $\delta_{шт} = 0,3$  мм;

$\delta_{вит}$  – товщина виткової ізоляції (додаток 1),  $\delta_{вит} = 0,5$  мм.

Отримане значення  $b_{м1}$  округляємо до найближчого стандартного значення (додаток 2).

Якщо ширина міді більше 6,9 мм, то розбиваємо за шириною ефективний провідник на два елементарних.

### 3.17. Висота міді обмотки

За обчисленим значенням  $Q_{1еф}$  і шириною міді  $b_{м1}$  вибираємо висоту міді  $a_{м1}$  (додаток 2). Ця висота з технологічних міркувань повинна бути менше 3,53 мм. Тому в разі потреби розбиваємо ефективний провідник за висотою на ряд елементарних. Уточнюємо значення перерізу, мм<sup>2</sup>:

$$Q_{1еф} = Q_{1ел} \cdot n_b \cdot n_a, \quad (36)$$

де  $Q_{1ел}$  – переріз елементарного провідника, мм<sup>2</sup>;

$n_b, n_a$  – число елементарних провідників в одному ефективному провіднику відповідно за шириною і висотою.

Обрані розміри міді повинні задовольняти умові  $(b_{м1}; a_{м1}) > 1,05$ .

**Приклад:**  $b_{м1} = 10,25$  мм;  $Q_{1еф} = 44,5$  мм<sup>2</sup>.

Оскільки  $b_{м1} > 6,9$  мм, розбиваємо провідник за шириною на два; за додатком 2 визначаємо  $b_{м1}$  (дорівнює 5,1 мм). Тоді переріз кожного елементарного провідника  $\frac{Q_{1еф}}{2} = 22,22$  мм, що відповідає його висоті  $a_{м1} > 3,53$  мм. Тому розбиваємо ефективний провідник і за висотою на два, тобто  $Q_{1ел} = 11$  мм. За додатком 2  $a_{м1} = 2,26$  мм. Одержуємо уточнене значення перерізу

$$Q_{1еф} = 11 \cdot 2 \cdot 2 = 44 \text{ мм}^2.$$

### 3.18. Заповнення паза по ширині і висоті та визначення розмірів паза $b_{п1}$ і $h_{п1}$ відповідно

Зразок заповнення паза наданий у додатку 3.

Навести масштабний ескіз – розріз паза з обмоткою.

### 3.19. Перевірка величини індукції в розрахунковому перерізі зубця

$$B_{z_1/3} = \frac{\Phi_1}{Q_{z_1/3}}, \text{ Тл,} \quad (37)$$

де  $Q_{z_1/3} = \alpha_i \cdot m \cdot q_1 \cdot l_{\text{ef}} \cdot b_{z_1/3}$ ,  $b_{z_1/3} = t_{z_1/3} - b_{n1}$ ,  
 $b_{n1}$  – ширина паза, отримана в підрозділі 3.14.

Отримане значення повинне знаходитися в межах  $1,4 \div 1,7$ . Якщо значення  $b_{z_1/3}$  виходить за ці межі, то необхідно змінити розміри паза, тобто розміри обмотки міді, скласти нове заповнення паза і знову перевірити величину  $b_{z_1/3}$ .

### 3.20. Перевірка величини індукції у спинці статора

$$B_{a1} = \frac{\Phi_1}{2Q_{a1}}, \text{ Тл,} \quad (38)$$

де  $Q_{a1} = h_{a1} \cdot l_{\text{ef}}$  – площа спинки статора,  $\text{м}^2$ ;

$h_{a1} = 0,5(D_a - D_i) - h_{n1} - a_1$  – висота спинки, м,

звідкіля  $h_{n1}$  – висота паза, отримана в підрозд.3.18;

$a_1$  – розмір, що враховує ослаблення перерізу спинки стяжними шпильками. Звичайно приймають  $a_1 = (0,5 \div 1)10^{-2}\text{м}$ .

Межі значення  $B_{a1} = 1,3 \div 1,5$  Тл. Якщо отримане значення  $B_{a1}$  не лежить у вказаних межах, то треба відповідно змінити внутрішній діаметр  $D_i$ , залишивши без зміни довжину машини, число витків і розміри паза.

При зміні діаметра  $D_i$  слід уточнити значення  $b_{z_1/3}$  і  $B_{\delta\text{max}}$ . При цьому передбачається, що зміна  $D_i$  не перевищить  $2,0 \div 3,0\%$ .

Якщо зміна  $D_i$  у зазначених межах не дає необхідного результату, потрібно змінити зовнішній діаметр  $D_a$ , перейшовши на наступний габарит.

### 3.21. Уточнене значення щільності струму

$$J_1 = \frac{I_{1\phi n} \cdot 10^6}{a \cdot Q_{1\text{ef}}}, \text{ А/м}^2. \quad (39)$$

### 3.22. Активний електричний опір обмотки статора

а) середня довжина витка частини обмотки статора, м,

$$l_{cep1} = 2(l_1 + l_{s1}), \quad (40)$$

де  $l_1$  – повна довжина осердя статора;

$l_{s1}$  – середня довжина лобової обмотки статора (додаток 4);

б) активний опір обмотки при 20°C, Ом,

$$r_{1хол} = \rho \frac{W_1 \cdot l_{cep1}}{a \cdot Q_{1ef}} = \frac{W_1 \cdot l_{cep1}}{57 a \cdot Q_{1ef}}, \quad (41)$$

де  $W_1$  – число витків фази;

$l_{cep1}$  – середня довжина витка, м;

$Q_{1ef}$  – переріз активного провідника, мм<sup>2</sup>;

$\rho$  – питомий опір, для міді при температурі

$$T = 20^\circ\text{C} \quad \rho = \frac{1}{57} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$a$  – число паралельних гілок;

в) активний опір обмотки при 75°C, Ом,

$$r_{1\ 75^\circ\text{C}} = r_{1хол} \cdot K_t = 1,22 r_{1хол}, \quad (42)$$

де  $K_t$  – температурний коефіцієнт;

$$K_t = 1 + 0,004(T - t) = 1 + 0,004(75 - 20)^0 = 1,22. \quad (43)$$

### 3.23. Активний опір у відносних одиницях

$$r_{1в.о.} = E_{rв.о.} = \frac{r_{115^\circ\text{C}} \cdot I_{1нф}}{U_{1нф}}, \quad (44)$$

де  $E_{r\ в.о.}$  – активне спадання напруги в обмотці статора при номінальному навантаженні, виражене у в.о. (відносних одиницях);

$U_{1нф}$  – номінальна фазна напруга, В.

Величину  $r_1 \%$  визначаємо за формулою

$$r_1 \% = r_{1\ в.о.} \cdot 100 \%. \quad (45)$$

Отримане значення  $r_1 \%$  звичайно лежить у межах 1,0÷3,0%.

### 3.24. Індуктивний опір обмотки статора

$$X_1 = 15,8 \left( \frac{f}{100} \right) \cdot \left( \frac{W_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{\sum \lambda_i \cdot l_i}{q_1 \cdot p}, \text{ Ом}, \quad (46)$$

де  $\sum \lambda_i$  - повна питома провідність потоків розсіювання статора (додаток 5);  
 $l_i$  – розрахункова довжина, м.

### 3.25. Індуктивний опір обмотки статора у відносних одиницях

$$X_{1\text{в.о.}} = F_{\text{хв.о.}} = \frac{X_1 \cdot I_{1\phi\text{н}}}{U_{1\phi\text{н}}}. \quad (47)$$

Індуктивний опір, виражений у відсотках,

$$X_1 \% = X_{1\text{в.о.}} \cdot 100\%. \quad (48)$$

Значення  $X_1 \%$  лежить в межах 7,0÷16%.

### 3.26. Вага обмотки статора

$$G_{\text{м1}} = 3l_{\text{сер1}} \cdot W_1 \cdot a \cdot Q_{1\text{еф}} \cdot \gamma \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (49)$$

де  $l_{\text{сер1}}$  – середня довжина витка обмотки статора, м;  
 $Q_{1\text{еф}}$  – переріз ефективного провідника обмотки, мм<sup>2</sup>;  
 $a$  – число паралельних гілок;  
 $\gamma$  – питома вага міді, для голої міді  $\gamma=8,9$ ; для ізольованої  $\gamma=9,8$ .

## 4. ПРОЕКТУВАННЯ ІНДУКТОРА

### 4.1. Полюс індуктора

Полюс звичайно має прямокутний переріз і виготовляється шихтуванням з листів гарячекатаної сталі товщиною  $\Delta=1,0\div1,5$  мм.

На торцях шихтованого полюса розташовані щокі (фланці), які утримують за допомогою заклепок жерсті полюса в запресованому стані (рис. 8).

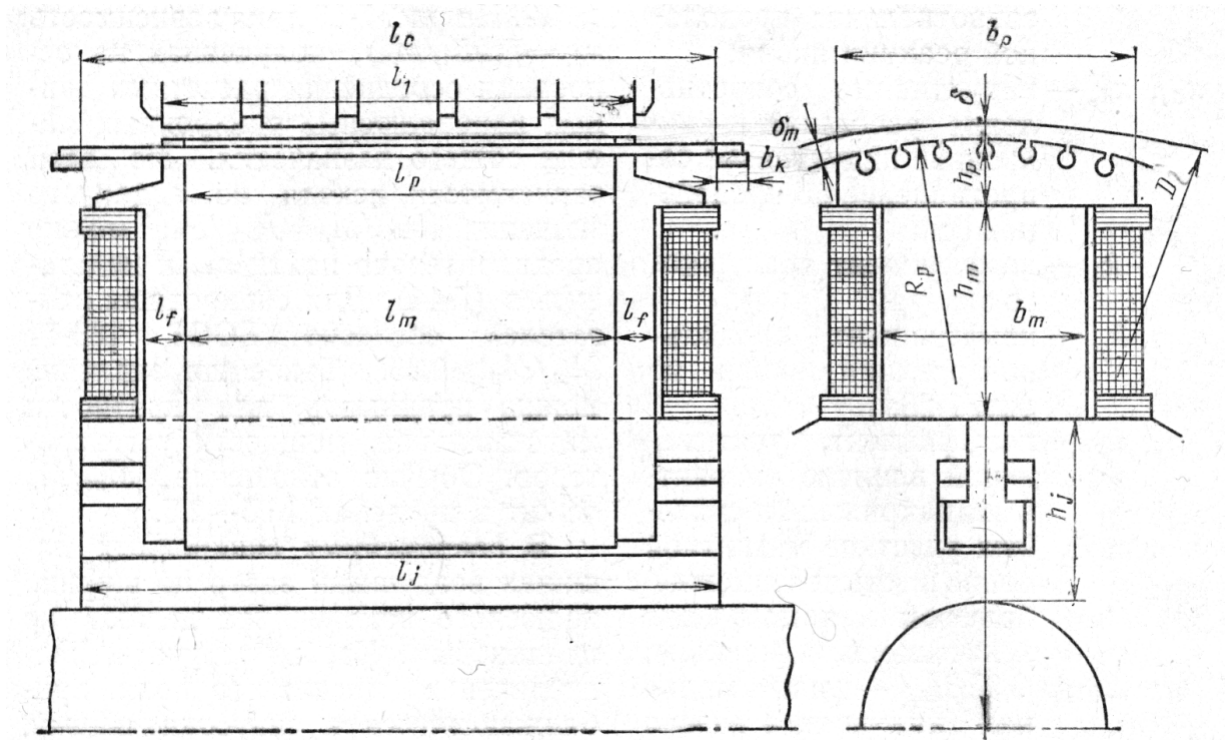


Рис. 8 - Ескіз полюса (розміри ротора синхронної явнополюсної машини)

Товщина фланця  $b_{фл}$  у функції числа пар полюсів наведена в табл. 6.

Таблиця 6 - Визначення товщини фланця

2р	ВКЗ	$\tau$ , м	$V_m$ , Тл	$K_m$	$b_{фл}$ , м
6	1÷0,8	0,35÷0,6	1,5÷1,42	0,15÷0,19	0,06÷0,05
8	1,1÷0,9	0,3÷0,55	1,48÷1,4	0,19÷0,24	0,045÷0,055
10	1,1÷0,9	0,25÷0,52	1,4÷1,35	0,25÷0,28	0,05÷0,035
12	1,2÷0,95	0,2÷0,45	1,4÷1,35	0,33÷0,28	0,045÷0,03
16	1,3÷1,1	0,2÷0,4	1,3÷1,25	0,32÷0,39	0,035÷0,025
20	1,3÷1,1	0,2÷0,35	1,3÷1,25	0,38÷0,41	0,025÷0,015
32	1,5÷1,1	0,13÷0,2	1,3÷1,25	0,5÷0,56	0,02÷0,012

Довжина полюса, м,

$$l_m = l_1 + 0,01. \quad (50)$$

#### 4.2. Повітряний зазор під серединою полюса

Попереднє значення величини повітряного зазору під серединою полюса, м,

$$\delta > 0,565 BKЗ \frac{A \cdot \tau \cdot 10^{-6}}{B_{\delta \max}} \cdot \frac{K_{обм1} \cdot K_{ад}}{K_{\delta}} = (0,35 \div 0,45) BKЗ \cdot \frac{A \cdot \tau \cdot 10^{-6}}{B_{\delta \max}}, \quad (51)$$

де  $K_{обм1}$  – обмотувальний коефіцієнт, приймається рівним 0,92;

$K_{ad}$  – коефіцієнт, що враховує явнополюсне виконання синхронної машини при розрахунку реакції по поздовжній осі,  $K_{ad} = 0,8 \div 0,9$ ;

$K_\delta$  – коефіцієнт повітряного зазору, попередньо приймається  $K_\delta = 1,15 \div 1,25$ ;

ВКЗ – відношення короткого замикання; при  $2p \leq 24$ , для двигунів і генераторів звичайно приймається ВКЗ =  $0,65 \div 0,75$ .

#### **4.3. Повітряний зазор по краях полюса**

Поверхня полюсного наконечника (башмака) окреслюється радіусом  $R_p$ . Для одержання форми ЕРС, близької до синусоїди, звичайно приймають

$$\delta_{\max} = 1,5\delta, \text{ м.} \quad (52)$$

#### **4.4. Ширина полюсного наконечника (башмака)**

$$b_p' = \alpha_i \cdot \tau, \text{ м.} \quad (53)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнт полюсного перекриття (конструктивний).

З достатнім ступенем точності можна прийняти  $b_p = b_p'$  (рис. 8).

#### **4.5. Попереднє значення коефіцієнта розсіювання полюса в режимі холостого ходу**

Коефіцієнт  $\sigma_m$  залежить від розмірів полюса, тому для попереднього розрахунку слід користуватися наближеною формулою

$$\sigma_m = 1 + \frac{8\delta}{\tau}. \quad (54)$$

#### **4.6. Попереднє значення ширини осердя полюса**

$$B_m = \frac{\Phi_m}{(l_m \cdot K_{\text{зап}} + 2b_{\text{фл}} \cdot K_{\text{фл}})B_m} = \frac{\Phi_1 \sigma_m}{(l_m \cdot K_{\text{зап}} + b_{\text{фл}})B_m}, \text{ м,} \quad (55)$$

де  $l_m$  – довжина полюса, м;

$K_{\text{зап}}$  – коефіцієнт заповнення при товщині жерсті полюса  $\Delta = 1,0 \div 1,5$  мм;  $K_{\text{зап}} = 0,98$ ;

$K_{\text{фл}}$  – коефіцієнт, що враховує корисну частину перерізу фланця, по якому проходить магнітний потік,  $K_{\text{фл}} = 0,4 \div 0,65$ ;  $K_{\text{фл}} \approx 0,5$ ;



$B_m$  – індукція в осерді полюса в режимі холостого ходу (вибираємо за табл. 6).

#### **4.7. Попереднє значення висоти осердя полюса**

Висота осердя полюса залежить від висоти котушки обмотки збудження. Котушку полюса великих і середніх синхронних машин звичайно виконують зі смугової міді, гнутої на ребро.

Висоту одношарової котушки, м, попередньо визначають за формулою

$$h_{\text{кот}} = \tau \cdot K_m + 0,04, \quad (56)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт (табл. 6).

Відповідно до попередньо прийнятої висоти котушки висота осердя полюса, м,

$$h_m = h_{\text{кот}} + 2h_{\text{рам}}, \quad (57)$$

де  $2h_{\text{рам}}$  – висота двох ізоляційних рамок (шайб), за допомогою яких котушка зверху і знизу ізолюється від полюса;  $h_{\text{рам}} = 0,008 \div 0,015$  м.

Матеріал рамки (шайби) – гетинакс або іоліт.

Висота полюса, а також всі інші попередньо визначені розміри полюса обов'язково перевіряють і остаточно встановлюють при розрахунку обмотки збудження за допомогою масштабного ескізу полюса з обмоткою.

#### **4.8. Висота полюсного наконечника (башмака)**

Звичайно в середній і великій синхронній машинах у полюсні наконечники (башмаки) закладається заспокійлива для генераторів і пускова для двигунів обмотка, виконувана з міді чи латуні. Для генераторів звичайно беруть мідь. У цьому разі висота полюсного башмака, м, приблизно визначається за формулою

$$h_p = (0,3 \div 0,4)(b_p - b_m) + d_d, \quad (58)$$

де  $d_d$  – діаметр стержня, м, пускової (чи заспокійливої) обмотки, що встановлюється нижче.

#### **4.9. Радіус заокруглення полюсного наконечника**

$$R_p = \frac{D_i}{2 + 8D_i \cdot \frac{(\delta_{\text{max}} - \delta)}{b_p^2}}, \text{ м.} \quad (59)$$

#### 4.10. Попередні розміри і число стержнів демпферної клітки для генераторів і двигунів

а) Крок демпферної клітки (обмотки) – зубцевий розподіл полюсного башмака  $t_{z_2}$ .

Крок  $t_{z_2}$  може бути більше або менше за крок пазів статора. У першому випадку ( $t_{z_2} > t_{z_1}$ ) беремо  $t_{z_2}$  не менше  $1,15t_{z_1}$ , у другому ( $t_{z_2} < t_{z_1}$ )  $t_{z_2}$  не більше  $0,87t_{z_1}$ . Причому крок  $t_{z_2}$  встановлюється по розточенню статора, а не по дузі полюсного башмака.

Обраний крок  $t_{z_2}$  не повинен викликати надмірних втрат у сталі і явищ прилипання в двигуні.

б) Число стержнів на полюс

$$n_2 = \frac{b_p - (0,025 \div 0,04)}{t_{z_2}} + 1. \quad (60)$$

в) Переріз стержня демпферної клітки генератора,  $\text{мм}^2$ ,

$$q_{cm} \geq \frac{(0,3 \div 0,6) 3q_1 \cdot S_n \cdot Q_{1ef}}{n_2}, \quad (61)$$

де  $S_n$  – число ефективних провідників у пазу статора;

$Q_{1ef}$  – переріз ефективного провідника обмотки статора,  $\text{мм}^2$ .

Рекомендується приймати нижню межу коефіцієнта – 0,3.

г) Переріз стержня пускової клітки двигуна. Струм у стержні в момент пуску, А,

$$I_{cm} = \frac{0,7 \cdot 2m \cdot W_1 \cdot K_{пуск} \cdot I_{1нф}}{2p \cdot n_2}, \quad (62)$$

де  $W_1$  – число витків фази обмотки статора;

$K_{пуск} \cdot I_{1нф}$  – очікуваний пусковий струм в обмотці статора, А;

$K_{пуск}$  – кратність пускового струму;  $K_{пуск} = 4,0 \div 6,0$ .

Переріз стержня,  $\text{мм}^2$ ,

$$q_{cm} = \frac{I_{cm}}{J_{2пуск}}, \quad (63)$$

де  $J_{2пуск}$  – припустима щільність струму при пуску; приймаємо  $25 \div 35 \text{ А/мм}^2$ .

д) Діаметр стержня демпферної (пускової) клітки, мм,

$$d_d = 1,13\sqrt{q_{cm}} . \quad (64)$$

За отриманою величиною  $d_d$  вибираємо найближчий нормальний діаметр стержня з ряду 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 і 15 мм.

е) Переріз кільця, мм<sup>2</sup>,

$$Q_k = 0,5n_2 \cdot q_{cm} . \quad (65)$$

#### **4.11. Розміри корпусу (обода) індуктора**

При розрахунку магнітного ланцюга зневажають величиною сили, що намагнічує (н.с.) корпусу через її мале значення.

Конструкцію корпусу ротора вибирають залежно від швидкості обертання ротора і діаметра корпусу [1, с.286].

Спосіб кріплення полюса до корпусу ротора вибирають залежно від величини зусилля, що діє на полюс під час роботи синхронної машини, і від конструкції корпусу ротора [1, с.206].

Довжина обода, м,

$$l_j = l_m + \Delta l_c . \quad (66)$$

Для великих машин  $\Delta l_c = (10 \div 15) \cdot 10^{-2}$  м; для середніх дорівнює  $(4 \div 5) \cdot 10^{-2}$  м, для малих – 0.

Товщина обода, м,

$$h_j = \frac{\alpha_i \cdot B_{\delta \max} \cdot \tau \cdot l_i \cdot \sigma_m}{2B_j \cdot l_j} . \quad (67)$$

Індукцію  $B_j$  вибирають в межах  $1 \div 1,3$  Тл.

Розрахункова довжина осердя полюса, м,

$$l'_m = l_m + l_f , \quad (68)$$

де  $l_f$  – товщина однієї щоби полюса,  $l_f = (1,5 \div 3) \cdot 10^{-2}$  м.

#### **4.12. Розрахунок характеристики холостого ходу**

Результати обчислень характеристики холостого ходу заносимо в табл. 7. Нижче наведені пояснення з окремих пунктів цієї таблиці.

Розрахунок н.с. ведуть на один полюс:

а) марки сталі статора і полюса вибирають за додатком 6;

б) довжини силової лінії окремих ділянок магнітопроводу:  
у зазорі

$$l_{\delta} = \delta \cdot K_{\delta 1}, \quad (69)$$

де  $K_{\delta 1}$  – коефіцієнт повітряного зазору для відкритих пазів,

$$K_{\delta 1} = \frac{5 + \frac{b_{n_1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{n_1}}{\delta} \cdot \frac{b_{z_1}}{t_{z_1}}}; \quad (70)$$

у зубцях статора

$$l_{z_1} = h_{n_1}; \quad (71)$$

Таблиця 7 - Характеристика холостого ходу

$E_1$	Одиниця виміру	0,58U <sub>1нф</sub>	0,1U <sub>1нф</sub>	1,21U <sub>1нф</sub>	1,33U <sub>1нф</sub>
$\Phi_1$	Вб				
$B_{\delta} = \frac{\Phi_1}{Q_{\delta}}$	Тл				
$B_{z_1/3} = \frac{\Phi_1}{Q_{z_1/3}}$	Тл				
$B_{a_1} = \frac{\Phi_1}{2Q_{a_1}}$	Тл				
$H_{z_1}$	А/м				
$H_{a_1}$	А/м				
$F_{\delta} = 0,8\delta \cdot K_{\delta 1} \cdot B_{\delta} \cdot 10^6$	А				
$F_{z_1} = H_{z_1} \cdot l_{z_1}$	А				
$F_{a_1} = H_{a_1} \cdot l_{a_1}$	А				
$F_{\delta} + F_{z_1} + F_{a_1}$	А				

$\Phi_{\delta} = (F_{\delta} + F_{z_1} + F_{a_1}) \cdot \lambda_{mp} \cdot 10^{-8}$	Вб				
$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_{\delta}$	Вб				
$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m}$	Тл				
$H_m$	А/м				
$F_m = H_m \cdot l_m$	А				
$F_{\delta m} = 0,016 B_m \cdot 10^4$	А				
$\sum F = F_{\delta} + F_{z_1} + F_{a_1} + F_m + F_{\delta m}$	А				
$\frac{\sum F}{\sum F_{E=1}}$					
$I_b = \frac{\sum F}{W_2}$	А				

у спинці статора

$$l_{n1} = \frac{\pi \cdot D_a}{4p}; \quad (72)$$

у полюсі

$$L_m = h_m + 0,2h_p; \quad (73)$$

в) перерізи ділянок магнітопроводу визначені раніше (див. підрозділи 3.9, 3.19, 3.20).

Переріз полюса, м<sup>2</sup> визначають за формулою

$$Q_m = b_m \cdot l_m \cdot K_{zan} + 2b_m \cdot b_{\phi l} \cdot K_{\phi l}; \quad (74)$$

г) потік полюса. При попередніх розрахунках він обчислюється приблизно, після визначення розмірів полюса (попередніх) слід розрахувати більш точно потік полюса

$$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_{\delta}; \quad (75)$$

$$\Phi_{\delta} = (F_{\delta} + F_{z_1} + F_{a_1}) \cdot \lambda_{mp} \cdot 10^{-8}; \quad (76)$$

де  $\Phi_\delta$  – потік розсіювання полюса в режимі холостого ходу;  
 $\lambda_{mp}$  – повна провідність полюсів (додаток 7).

Визначаємо коефіцієнт розсіювання полюсів:

$$G_m = 1 + \frac{\Phi_\delta}{\Phi_1}; \quad (77)$$

д) величину напруженостей  $H_{z_1}$ ,  $H_{a_1}$ ,  $H_m$  знаходимо для прийняття сталі залежно від індукції в додатку 6;

е) величиною н.с. ярма індуктора в розрахунку звичайно зневажають;

ж) розраховуємо н.с. зубців статора, коли  $B_{z_1/3}$  визначаємо по кривих намагнічування, приведеним на рис. 9, 10, 11, за коефіцієнтом

$$K_{z_1} = \frac{t_{z_1/3} - 0,93b_{z_1/3}}{0,93b_{z_1/3}}; \quad (78)$$

з) визначаємо величину н.с. додаткового повітряного зазору під башмаком полюса  $F_{\delta m}$ .

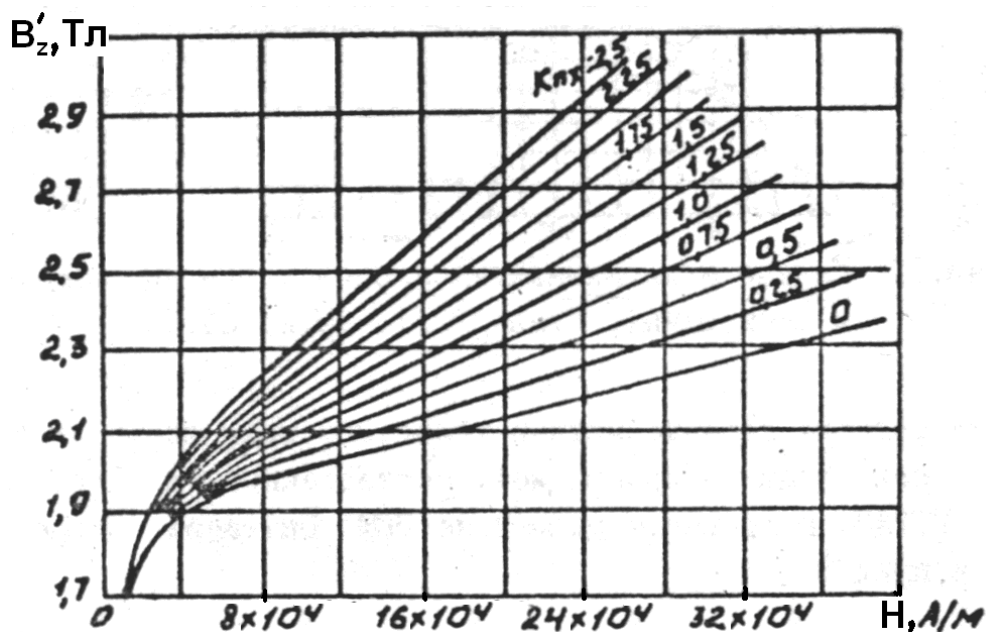


Рис. 9 - Криві намагнічування сталі 1411 (до визначення магнітного напруження зубців машин сталого струму і синхронних)

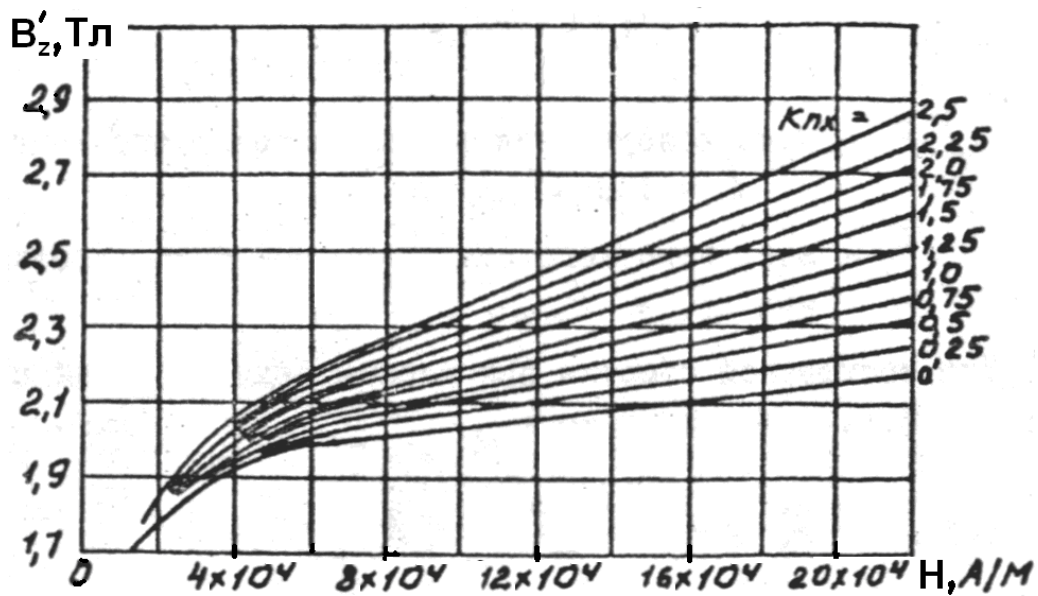


Рис. 10 - Криві намагнічування сталей 1511, 1512, 1513  
(до визначення магнітного напруження зубців машин сталого струму і синхронних)

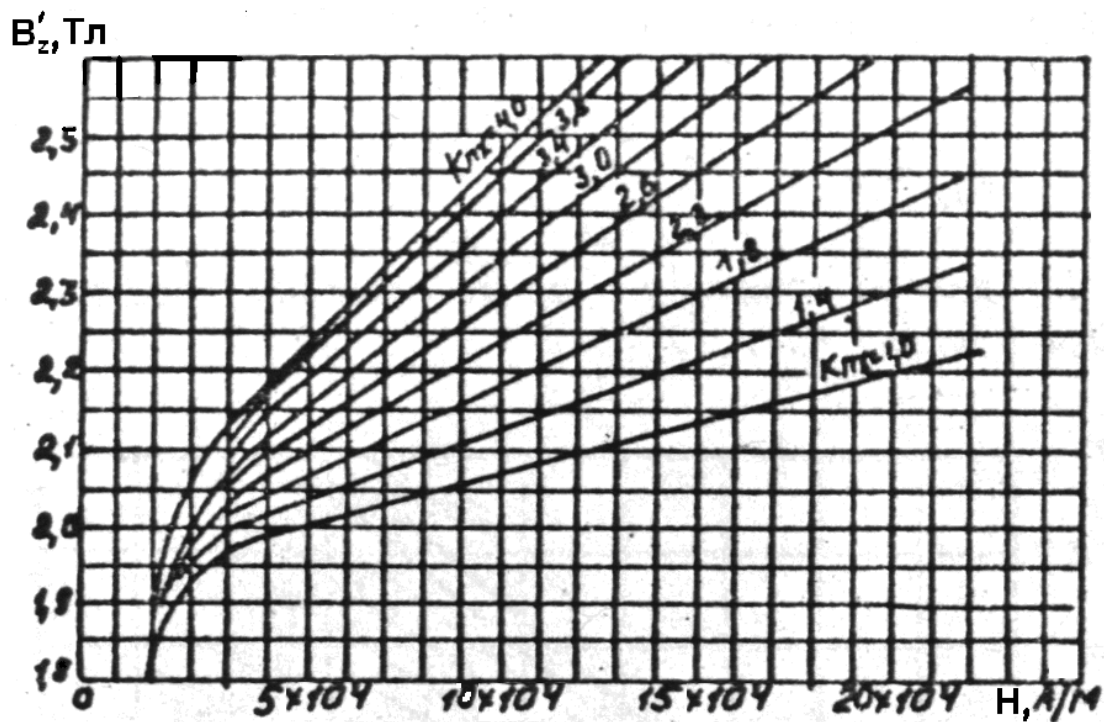


Рис. 11 - Криві намагнічування зубців машин сталого струму і синхронних.  
Сталь 2211, 2312, 2411

#### 4.13. Перевірка значення ВКЗ

$$BKЗ = \frac{\sum F}{F_{\kappa}}, \quad (79)$$

де  $\sum F$  – н.с. в режимі холостого ходу при  $E = 1,0 U_{1\phi H}$  ;

$F_k$  – н.с. короткого замикання при струмі короткого замикання  $I_k = I_{1\phi n}$ .

Для трифазної обмотки при ширині індукційної сторони фази в  $60^\circ$  н.с. реакції статора

$$F_r = \frac{1,1W_1 \cdot I_{1\phi n}}{p} \cdot K_y, \quad (80)$$

де  $I_{1\phi n}$  – номінальний струм фази статора.

Силу короткого замикання, що намагнічує, визначаємо за формулою

$$F_k = F_r + X_{1\phi.o.} (F_{\delta E=1} + F_{\delta m E=1}), \quad (81)$$

де  $F_{\delta E=1}$ ,  $F_{\delta m E=1}$  – відповідні н.с. при  $E = 1,0 U_{1\phi n}$ .

Отримане значення ВКЗ повинне знаходитися в межах  $0,9 \div 1,2$ .

Винятком є:

а) синхронні компенсатори, в яких  $ВКЗ < 0,9$ ;

б) багатополюсні синхронні ( $2p \geq 20$ ), в яких ВКЗ може бути більше 1,2.

Якщо при перевірці виявиться, що значення ВКЗ відрізняється від попередньо прийнятого значення більше, ніж на 10%, то треба змінити зазор, внести відповідні зміни в обчислення н.с. і знову перевірити ВКЗ.

#### **4.14. Н.С. обмотки, що намагнічує, при номінальному навантаженні**

Для розрахунку н.с. при навантаженні необхідно визначити н.с. магнітного кола при навантаженні. Для цього прорахуємо одну точку кривої намагнічування при навантаженні, що відповідає результуючій ЕРС в обмотці статора.

а. Результуюча ЕРС в обмотці статора генератора при відстаючому струмі

$$E_{\phi e} = \sqrt{(\cos \varphi + E_{r\phi e})^2 + (\sin \varphi + E_{x\phi e})^2}. \quad (82)$$

б. Результуюча ЕРС в обмотці статора двигуна при випереджальному струмі

$$E_{\phi e} = \sqrt{(\cos \varphi - E_{r\phi e})^2 + (\sin \varphi + E_{x\phi e})^2}. \quad (83)$$

в. Активне та індуктивне спадання напруги,  $B$ ,

$$E_t = E_{t\phi e} \cdot U_{1\phi n}; \quad E_x = E_{x\phi e} \cdot U_{1\phi n}. \quad (84)$$

г. Магнітний потік при навантаженні



$$\Phi_{1H} = \Phi_{1E_{Be}}, \quad (85)$$

де  $\Phi_1$  – магнітний потік у режимі холостого ходу при  $1,0 U_{1фн}$ .

д. Н.с. магнітного ланцюга, що відповідає ЕРС

$$F_E = F_{\delta E} + F_{aE} + F_{zE} + F_{mE} + F_{\delta\delta o\delta E}, \quad (86)$$

де  $F_{\delta E}, F_{aE}, F_{zE}$  – н.с., обчислені для індукцій, що відповідають потоку навантаження  $\Phi_{1H}$ ;

$F_{mE}, F_{\delta\delta o\delta E}$  – н.с., обчислені для індукції  $B_{mE}$ ;

е. Індукція полюса

$$B_{mE} = \frac{\Phi_{mE}}{Q_m}, \quad (87)$$

$$\Phi_{mE} = \Phi_{1H} + \Phi_{\delta} = \Phi_{1H} + \lambda_{mp} (F_{\delta E} + F_{aE} + F_{zE} + K_e \cdot F_r) \cdot 10^{-8}, \quad (88)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт, що залежить від  $\cos \varphi$ , визначають за рис. 12;

$F_r$  – н.с. реакції статора.

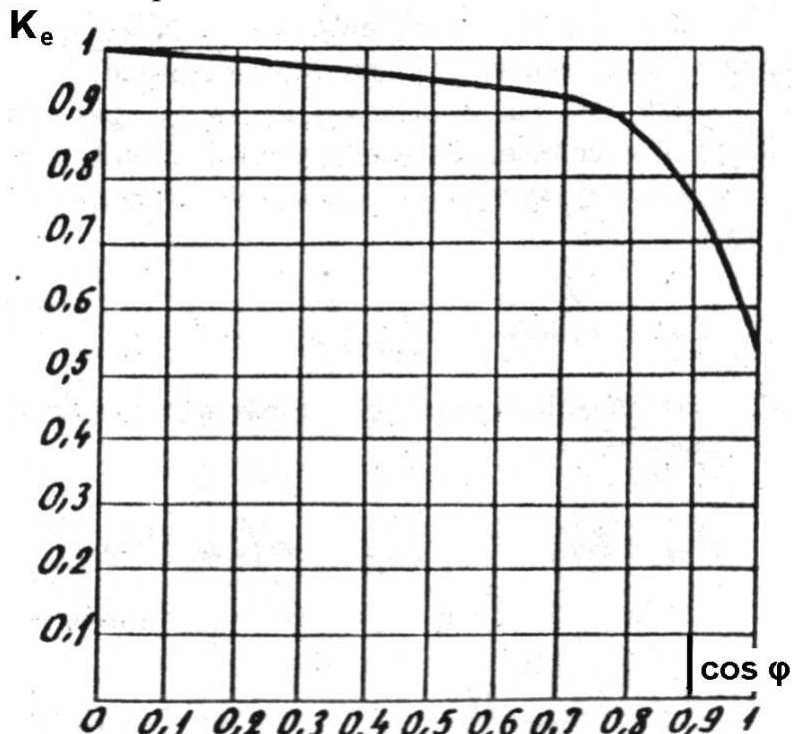


Рис. 12 - До визначення н.с. при навантаженні синхронних машин, коефіцієнт  $K_e$

ж. Величину н.с. обмотки збудження при навантаженні знаходять за векторною діаграмою Потьє (рис. 13).

Побудову спрощеної діаграми виконують в наступному порядку. Під кутом  $\varphi$  до вектора струму (з урахуванням знака  $\varphi$ ) відкладаємо вектор напруги  $U_{1\phi H}$ , до нього додаємо вектор спадання напруги в обмотці статора (індуктивне  $E_x$  і омичне  $E_r$ , виражені у вольтах). Результуючий вектор  $E$  представляє результуючу ЕРС обмотки статора при навантаженні.

Перпендикулярно до вектора  $E$  відкладаємо вектор  $F_E$ . З кінця вектора  $F_E$  паралельно напрямку вектора струму відкладаємо вектор н.с. реакції обмотки статора  $F_r$ .

Результуючий вектор  $F_{3H}$  представляє н.с. обмотки збудження при номінальному навантаженні.

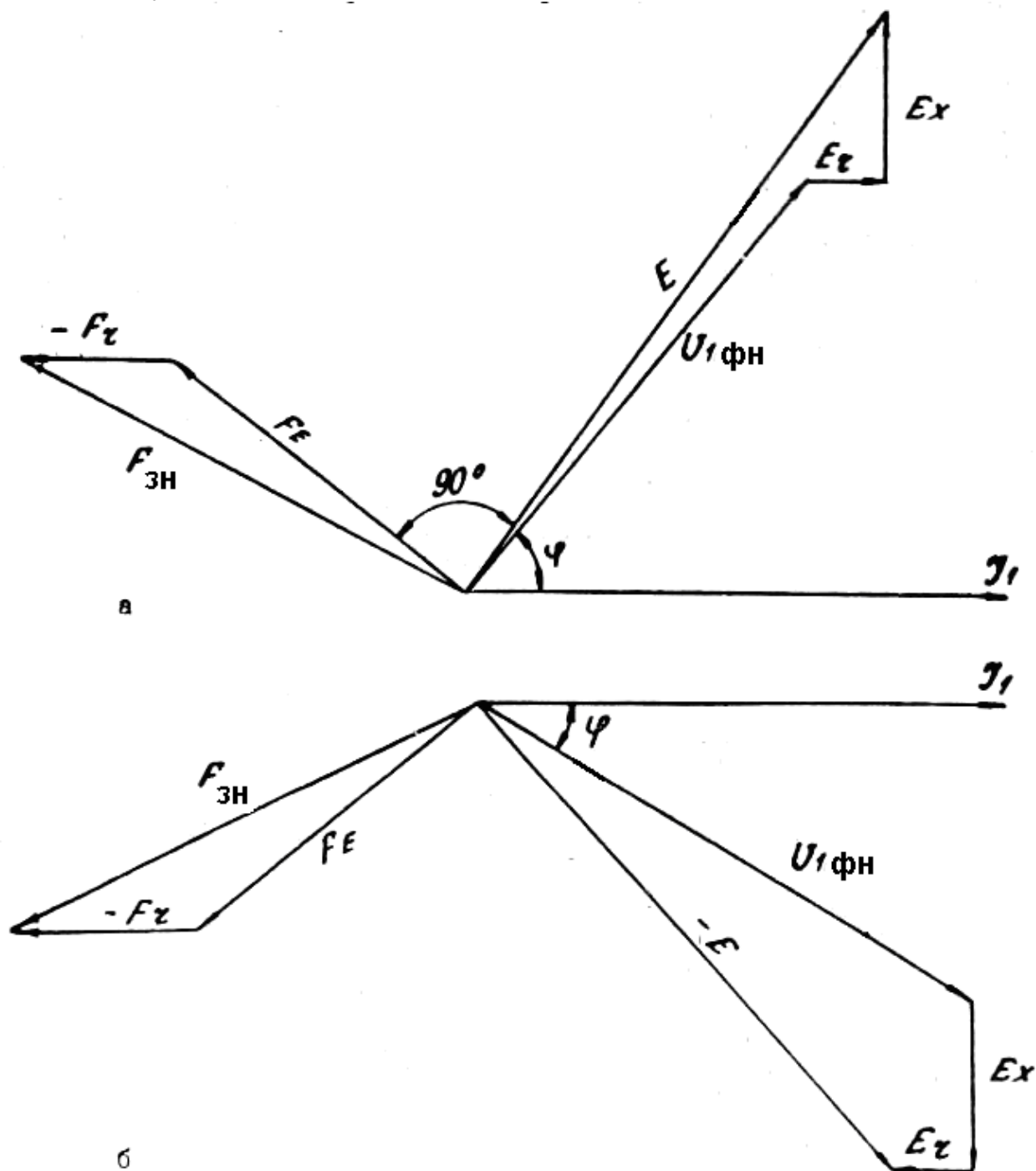


Рис. 13 - Діаграми: а - генератора при відстаючому струмі; б - двигуна при випереджуючому струмі

#### 4.15. Переріз провідника обмотки збудження

$$q_{m2} = K_{зз} \cdot K_t \frac{2p \cdot l_{сер2} \cdot F_{зн}}{57(U_2 - \Delta U_2)}, \text{ мм}^2, \quad (89)$$

де  $K_{зз}$  – коефіцієнт запасу збудження,  $K_{зз} = 1,15 \div 1,25$ ;

$K_t$  – температурний коефіцієнт,  $K_t = 1,32$ ;

$l_{сер2}$  – середня довжина витка обмотки збудження, м;

$U_2$  – напруга збудження, В;

$\Delta U_2$  – спадання напруги в щітковому контакті,  $\Delta U_2 = 3 \div 5$  В.

Обмотку збудження при потужності синхронної машини вище 250 кВт звичайно виконують зі смугової міді, гнутої на ребро. Смугову мідь можна гнути, якщо її товщина більше 14,5 мм (але не більше 60 мм), а по перерізу більше 30 мм<sup>2</sup>. Одношарові обмотки зі смугової міді, намотані на ребро, дуже доцільні, тому що забезпечують найкращі умови охолодження і допускають більш високе навантаження за струмом в порівнянні з багатошаровими. Тому в синхронних машинах середньої потужності для виготовлення такої обмотки застосовують збуджувачі з нестандартною величиною напруги 40, 55, 65, 80 і 100 В. У великих синхронних машинах одношарову обмотку виготовляють для стандартних значень напруги збудження 115 і 230 В.

Для обчислення перерізу знаходимо попереднє значення середньої довжини витка обмотки, м,

$$l_{сер2} = 2[l_m + (b_m - 2b_{фл})] + \pi \cdot R_a, \quad (90)$$

де  $R_a$  – середній радіус заокруглення, м,

$$R_a = b_{фл} + 0,5b_{m2} + a, \quad (91)$$

де  $b_{фл}$  – товщина фланця (див. табл. 6);

$a = 0,005$  м – для плоского фланця;  $a = 0,0075$  м – для напівкруглого фланця;

$b_{m2}$  – ширина міді, попередньо приймають  $b_{m2} = 0,02 \div 0,04$  м.

#### **4.16. Попереднє значення числа витків обмотки збудження і розмірів міді**

а. Вибір щільності струму. Щільність струму  $J_{m2}$  в режимі номінального навантаження одношарової обмотки збудження лежить в межах  $4,5 \div 3 \text{ А/мм}^2$ .

б. Попереднє значення струму збудження при номінальному навантаженні, А,

$$I_{3H} = q_{m2} \cdot J_{m2}. \quad (92)$$

в. Попереднє значення числа витків одного полюса

$$W_2 = \frac{F_{3H}}{i_{3H}}. \quad (93)$$

г. Попереднє значення висоти міді обмотки, мм

$$a_{m2} = \frac{h_m - 2h_{рам}}{W_2} - 0,25, \quad (94)$$

де  $h_m$  – висота полюса, мм;

$h_{рам}$  – висота гетинаксової рамки, рівна  $10 \div 15$  мм;

0,25 – товщина азбестової прокладки, мм.

Величину  $a_{m2}$  округляємо до найближчого стандартного розміру (додаток 2).

Осердя полюса ізолюємо пролуженим азбестовим папером товщиною 0,3 мм і формувальним міканітом 0,3 мм. Загальна однобічна товщина ізоляції полюса складає 6 мм (клас ізоляції В).

д. Ширина міді. За перерізом  $q_{m2}$  і висотою  $a_{m2}$  вибираємо найближче значення ширини міді  $b_{m2}$  (додаток 2), уточнюємо переріз (додаток 2) і перевіряємо щільність струму, А/мм<sup>2</sup>:

$$J_{m2} = \frac{i_{3H}}{q_{m2}}. \quad (95)$$

е. Перевірка відношення  $b_{m2}/a_{m2}$ , що з технічних міркувань повинне задовольняти умові  $(b_{m2}/a_{m2}) < 3,5$ .

#### **4.17. Уточнення розмірів обмотки збудження**

а. На масштабному ескізі вичерчуємо пари полюсів з обмоткою збудження і визначаємо мінімальну відстань між обмотками (катушками). Для  $2p \leq 10$  ця величина має бути більше  $5 \div 10$  мм.

б. Уточнюємо розміри міді, число витків, висоту котушок, висоту і ширину полюса.

Висоту осердя полюса, мм, визначаємо за формулою

$$h_m = \left(W_2 + \frac{1}{2}\right)a_{m2} + \Delta_{iz}\left(W_2 - \frac{1}{2}\right) + 2h_p + \Delta_{укл}, \quad (96)$$

де  $\Delta_{iz}$  – товщина азбестової прокладки, рівна 0,25 мм;

$h_p$  – товщина рамки, приймають 10÷15 мм;

$\Delta_{укл}$  – технологічний допуск, рівний 0,8÷1,5 мм.

#### **4.18. Уточнення розрахунку характеристики холостого ходу і н.с.**

Якщо розміри полюса після їхнього уточнення змінені більше, ніж на 5%, то в розрахунок характеристики холостого ходу і в розрахунок н.с. при номінальному навантаженні вносимо відповідні уточнення.

#### **4.19. Опір обмотки збудження в холодному стані (20°C)**

$$R_{2хол} = \frac{2p \cdot W_2 \cdot l_{сер2}}{57q_{m2}}, \text{ Ом.} \quad (97)$$

#### **4.20. Опір обмотки збудження в гарячому стані**

$$R_{2гар} = R_{2хол} \cdot K_t, \text{ Ом,} \quad (98)$$

де  $K_t$  – температурний коефіцієнт; для ізоляції класу В  $K_t = 1,4$ .

#### **4.21. Максимальний струм збудження**

$$i_{3\max} = \frac{U_2 - \Delta U_{щ}}{R_{2гар}}, \text{ А,} \quad (99)$$

де  $\Delta U_{щ}$  – спадання напруги в щітковому контакті (3÷5 В).

#### **4.22. Струм збудження при номінальному навантаженні**

$$i_{3H} = \frac{F_{3H}}{W_2}, \text{ А.} \quad (100)$$

#### **4.23. Запас збудження**

$$K_{33} = \frac{i_{3 \max}}{i_{3H}}. \quad (101)$$

Запас збудження повинен бути більше 15%, тобто необхідно, щоб  $K_{33} > 1,15$ .

#### **4.24. Вага міді обмотки збудження**

$$G_{m2} = 2p \cdot l_{\text{сер}2} \cdot W_2 \cdot q_{m2} \cdot \gamma \cdot 10^{-3}, \text{ кг,} \quad (102)$$

де  $l_{\text{сер}2}$  - середня довжина витка, м;

$q_{m2}$  – переріз міді, мм<sup>2</sup>;

$\gamma$  – питома вага міді, для голої міді  $\gamma = 8,9$ .

#### **4.25. Питома витрата міді обмотки збудження**

$$q_{m2} = \frac{G_{m2}}{P_H}, \text{ кг/кВт.} \quad (103)$$

Значення питомої витрати міді знаходиться в межах 0,3÷0,9 кг/кВт.

### **5. ВТРАТИ І ККД У РЕЖИМІ НОРМАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

#### **5.1. Втрати в режимі холостого ходу**

а. Механічні втрати, кВт,

$$P_{\text{мех}} = 3,68p \left( \frac{V_K}{40} \right)^3 \sqrt{l_1}, \quad (104)$$

де  $V_K$  – колова швидкість ротора, м/с,  $V_K = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{60}$ .

б. Втрати в сталі осердя статора, кВт:  
у спинці жерстей

$$P_{\text{ста}} = 2p \cdot \Phi_1 \cdot K_{f1} \cdot l_{a1} \cdot B_a, \quad (105)$$

у зубцях

$$P_{cmz} = 2p \cdot \Phi_1 \cdot K_{f2} \cdot l_{z1} \cdot B_{z1}, \quad (106)$$

де  $l_{a1}$ ,  $l_{z1}$  – довжини ділянок магнітопроводу, м;

$\Phi_1$  – магнітний потік статора, Вб;

$p$  – число пар полюсів;

$B_{a1}$ ,  $B_{z1}$  – індукції в режимі холостого ходу при  $E = 1,0 U_{1фн}$ ;

$K_{f1}$ ,  $K_{f2}$  – коефіцієнти, що залежать від сорту сталі (табл. 8).

Таблиця 8 - Визначення коефіцієнтів

Сталь	1411	1511	1211
$K_{f1}$	20,2	15,7	33,4
$K_{f2}$	31,2	24,2	51,5

в. Втрати в полюсних башмаках, кВт,

$$P_p = K_p \left( \frac{z_1 \cdot n_1}{10^4} \right)^{1,5} \cdot (B_p \cdot t_{z1}) \cdot S \cdot 10^{-3}, \quad (107)$$

де  $z_1$  – число пазів статора;

$n_1$  – швидкість обертання;

$t_{z1}$  – зубцовий розподіл у розточенні, м;

$S$  – поверхня полюсних башмаків, м<sup>2</sup>,

$$S = 2p \cdot b_p \cdot l_p, \quad (108)$$

$$B_p = \beta_p \cdot K_{\delta 1} \cdot B_{\delta \max}, \quad (109)$$

де  $K_{\delta 1}$  – коефіцієнт повітряного зазору;

$B_{\delta \max}$  – індукція в зазорі при холостому ході, Тл.

Коефіцієнти  $\beta_p$ ,  $K_p$  визначають за табл. 9, 10 залежно від товщини жерсті полюса  $\Delta_{ж}$ , мм.

Таблиця 9 - Визначення коефіцієнта  $K_p$

$\Delta_{ж}$ , мм	0,5	1,0	2,0
$K_p$	2,8	5,0	8,6

Таблиця 10 - Визначення коефіцієнта  $\beta_p$

$B_{n1}/\delta$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$\beta_p$	0,075	0,15	0,225	0,28	0,32	0,35

г. Повні втрати холостого ходу, кВт,

$$P_{xx} = P_{mex} + P_{ста} + P_{смz} + P_P. \quad (110)$$

### **5.2. Електричні втрати в статорній обмотці (втрати в міді)**

$$P_{м1} = 3I_{1\phi n}^2 \cdot r_{115^0 C} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}. \quad (111)$$

### **5.3. Додаткові втрати**

В основному ці втрати складаються із втрат від поверхневого ефекту в пазових частинах статорної обмотки, втрат від третьої гармоніки, втрат у натискних сегментах статора.

З достатньою точністю можна оцінити додаткові втрати у відсотках від номінальної потужності, кВт:

- а) для машин до 100 кВт – 0,5%;
- б) для машин понад 100 кВт – 0,25÷0,4%.

### **5.4. Втрати на збудження**

$$P_z = \frac{i_{zn}^2 \cdot R_{2_{75^0 C}}}{\eta_z} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (112)$$

де  $i_{zn}$  – номінальний струм збудження;

$$R_{2_{75^0 C}} = R_{2хол} \cdot K_t = 1,22 R_{2хол};$$

$\eta_z$  – ККД збуджувача, приблизно 0,8.

### **5.5. Повні втрати машини**

$$\sum P = P_{xx} + P_{м1} + P_z + P_{доd}, \text{ кВт}, \quad (113)$$

де  $P_{доd}$  – додаткові втрати при номінальному навантаженні.

### **5.6. Коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні**

Для генератора



$$\eta = \left( 1 - \frac{\sum P}{S'_H \cdot \cos \varphi + \sum P} \right) \cdot 100\% ; \quad (114)$$

для двигуна

$$\eta = \left( 1 - \frac{\sum P}{S'_H \cdot \cos \varphi} \right) \cdot 100\% . \quad (115)$$

## 6. РОЗРАХУНОК НАГРІВАННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА Й ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

### 6.1. Перевищення температури сталі статора над температурою навколишнього повітря

$$\Delta t_{cm} = \frac{(W_1 + W_2) \gamma_{cm}}{1 + 0,1 V_K}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (116)$$

де  $W_1$  – питоме теплове навантаження від втрат у сталі статора, віднесене до поверхні розточення статора,  $\text{Вт/м}^2$ ,

$$W_1 = \frac{P_{cm}}{\pi \cdot D_i \cdot l_{cm}}, \quad (117)$$

де  $P_{ст} = P_{ста} + P_{стз}$  – втрати в сталі статора, Вт;

$l_{ст}$  – довжина осердя статора без вентиляційних каналів, м;  $l_{ст} = n_{пак} \cdot l_{пак}$ ;

$D_i$  – діаметр розточення, м;

$V_K$  – колова швидкість індуктора, м/с;

$W_2$  – питоме теплове навантаження від втрат у міді обмотки статора, віднесене до поверхні розточення статора,  $\text{Вт/м}^2$ ,

$$W_2 = \frac{A \cdot J_1}{\gamma_t}, \quad (118)$$

$\gamma_t$  – постійна, залежна від температури нагрівання обмотки; для обмотки статора з ізоляцією класу В  $\gamma_t = 40 \cdot 10^6$  См/м, для обмотки статора з ізоляцією класу А  $\gamma_t = 42,5 \cdot 10^6$  См/м;

$\gamma_{ст}$  – постійна, що характеризує тепловіддачу статора. Залежно від величини відношення повної довжини  $l_1$  до полюсного розподілу  $\tau$  ця постійна повинна бути прийнята за табл. 11.

Таблиця 11 - Визначення постійної  $\gamma_{ст}$

$\frac{l_1}{\tau} \leq 2$	$2 < \frac{l_1}{\tau} < 4$	$4 < \frac{l_1}{\tau} < 5$
$\gamma_{ст} = 125 \cdot 10^{-4}$	$\gamma_{ст} = 150 \cdot 10^{-4}$	$\gamma_{ст} = 175 \cdot 10^{-4}$

## **6.2. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора над температурою навколишнього повітря**

$$\Delta t_s = \frac{W_3}{13,3(1 + 0,07V_k)}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (119)$$

де  $W_3$  – питоме теплове навантаження від втрат у міді обмотки статора, віднесене до поверхні пазів статора, Вт/м<sup>2</sup>,

$$W_3 = W_2 \frac{t_{z_1}}{P_{z_1}}, \quad (120)$$

де  $t_{z_1}$  – зубцовий розподіл статора в розточенні;

$P_{z_1}$  – периметр паза,  $P_{z_1} = 2(h'_{n_1} + b_{n_1})$ ;

$h'_{n_1}$  – висота паза до клина.

## **6.3. Середній перепад температури в ізоляції обмотки статора**

$$\Delta t_{iz} = \frac{\delta'}{0,16} W_3, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (121)$$

де  $\delta'$  – однобічна товщина ізоляції, мм;

$$\delta' = \frac{1}{2} [b_{n_1} - (b_{m1} + \delta_{m1})],$$

де  $b_{n_1}$  – ширина паза статора;

$b_{m1}$  – повна ширина голої міді в пазі;

$\delta_{m1}$  – допуск на мідь за шириною, прийнятий при заповненні паза.

## **6.4. Середнє перевищення температури міді обмотки статора над температурою навколишнього повітря**

$$\Delta t_{m1} = \frac{1}{0,5l_{сep1}} [(\Delta t_{cm} + \Delta t_{iz}) l_{cm} + (\Delta t_s + \Delta t_{iz})(0,5l_{сep1} - l_{cm})], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (122)$$

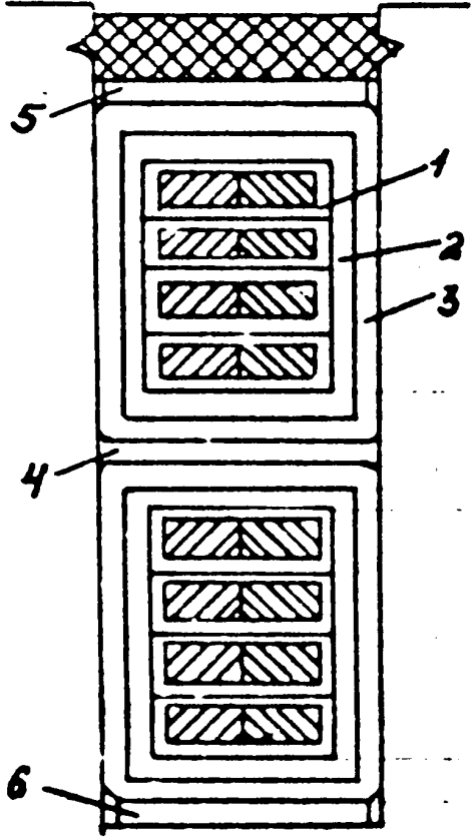
де  $l_{сep1}$  – середня довжина витка обмотки статора.

Отримані значення перегріву не повинні перевищувати: 65°C – для ізоляції класу А; 85°C – для ізоляції класу В.

Таблиця п.1.1 - Гільзова ізоляція класу F статорних обмоток змінного струму потужністю від 100 до 1000 кВт на напругу 3000÷3300 В

Частина обмотки	Позиція	Матеріал			Число шарів		Товщина ізоляції	
		Найменування	Марка	Товщина, мм	За шириною	За висотою	За шириною	За висотою
	1	Ізоляція провідника	-	-	-	-	-	-
	2	Скляна стрічка	ЛЭС	0,1	1 шар у разбірку	-	0,2	0,2
	3	Скломікафолій	МФП-Т	0,2	6,5 оборотів	-	2,6	2,6
		Товщина ізоляції котушки	-	-	-	-	2,8	2,8
		Припустимі відхилення	-	-	-	-	± 0,4	+ 0,6 - 1,2
	4	Склолакотканина	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Склотекстоліт	СТЭФ	0,5	-	1	-	0,5
	6	Склотекстоліт	СТЭФ	0,5	-	1	-	0,5
	7	Склотекстоліт	СТЭФ	1,0	-	1	-	1,0
		Допуск на укладання	-	-	-	-	0,5	0,5
		Усього на паз без клина	-	-	-	-	3,6	8,8

Таблиця п.1.2 - Безперервна ізоляція класу В котушок статорних обмоток машин змінного струму на напругу до 10 000 В

Частина обмотки	Позиція	Матеріал		Число шарів, не менше	Товщина ізоляції, м	
		Найменування	Товщина, мм		За шириною	За висотою
		Виткова ізоляція				
	1	Ізоляція провідника	-			
		Корпусна ізоляція				
	2	Склянолюдинитова стрічка ЛС: при U = 10,5 кВ U = 6,6 кВ	0,13	9 напівнакрив 6 напівнакрив	6 4,5	6 4,5
	3	Стрічка скляна ЛЭС	0,1	1 впритул	0,2	0,2
		Товщина ізоляції котушкової сторони: при U = 10,5 кВ U = 6,6 кВ			6,2 4,7	6,2 4,7
		Прокладки в пазу				
	4	Склотекстоліт СТ-1	1	2	2	2
	5, 6	Склотекстоліт СТ-1	0,5	2	1	1
		Загальна товщина ізоляції на паз: при U = 10,5 кВ U = 6,6 кВ			6,2 4,7	15,4 12,4



		Всього ізоляції в пазу					4,95	5,5	13,6	14,7	15,8	16,9	18,0	19,1	20,2	21,3	22,4	23,5	24,6	25,7	26, 8
--	--	------------------------------	--	--	--	--	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----------

## Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної міді

Макси- мальна товщина ізоляції	0,27											0,33							
Допуск на мідь	0,02				0,03							0,04					0,05		
	<i>b/a</i>	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	
	2,1	1,89	2,06	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	3,92	-	-	-	-	-	-	
	2,26	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	-	-	4,63	-	-	-	-	-	
	2,44	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,21	4,55	4,64	-	5,37	-	-	-	-	
	2,63	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	3,80	4,21	4,55	4,92	5,04	5,46	5,94	6,44	-	-	-	
	2,83	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	4,91	5,31	5,46	5,92	6,43	-	7,53	-	-	
	3,05	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	6,41	6,96	7,54	8,15	8,72	-	
	3,28	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,3	5,73	6,19	6,41	6,93	7,52	8,15	8,80	9,51	10,3	
	3,53	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	6,18	6,69	6,93	7,50	8,13	8,80	9,51	10,3	11,1	
	3,8	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,3	11,1	12,0	
	4,1	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,3	11,1	12,0	13,0	
	4,4	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,17	8,76	9,46	10,2	11,1	12,0	12,9	13,9	
	4,7	4,49	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,18	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1	11,0	11,9	12,78	13,8	14,9	
	5,1	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	7,76	8,36	9,02	9,74	10,2	11,0	11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	
	5,5	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	8,33	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14,0	15,1	16,3	17,5	
	5,9	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15,0	16,2	17,5	18,9	
	6,4	6,19	6,7	7,24	7,79	8,33	9,07	9,17	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0	15,1	16,3	17,6	19,0	20,5	

Макси- мальна товщина ізоляції	0,33					0,44							
Допуск на мідь	0,05					0,07							
	<i>b/a</i>	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	
	2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2,44	-	-	-	-	-	-					-	
	2,63	-	-	-	-	-	-					-	
	2,83	-	-	-	-	-	-					-	
	3,05	-	-	-	-	-	-					-	
	3,28	-	-	-	-	-	-					-	
	3,53	12,0	12,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3,8	-	13,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4,1	14,0	15,1	15,9	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4,4	15,0	16,2	17,1	18,5	-	-	-	-	-	-	-	
	4,7	16,1	17,4	18,4	-	21,2	-	-	-	-	-	-	
	5,1	17,5	18,9	20,0	21,5	-	25,1	-	-	-	-	-	
	5,5	18,9	20,4	21,7	23,3	-	27,2	-	-	-	-	-	
	5,9	20,3	21,9	23,3	25,1	26,8	29,2	-	34,5	-	-	-	
	6,4	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2	31,7	34,5	37,5	-	-	-	



Макси- мальна товщина ізоляції	0,27											0,33				
Допуск на мідь	0,02				0,03							0,04				
	<i>b/a</i>	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,55	2,10	2,26	2,24	2,63	
	6,9	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	10,6	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1	16,3	17,7	
	7,4	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	11,3	12,6	13,3	14,2	15,0	16,2	17,6	19,0	
	8,0	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6	19,0	20,5	
	8,6	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9	20,5	22,2	
	9,3	9,08	9,83	10,6	11,4	12,4	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,0	20,5	22,2	24,0	
	10,0	9,78	10,6	11,4	12,3	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1	23,9	25,8	
	10,8	10,6	11,4	12,2	-	14,4	15,5	16,6	17,9	19,3	20,9	22,2	23,9	25,9	27,9	
	11,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,9	19,3	20,8	22,4	23,9	25,7	27,8	30,0	
	12,5	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5	17,9	19,4	20,8	22,4	24,2	25,8	27,8	30,0	32,4	
	13,5	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8	19,1	20,8	22,5	24,2	26,1	27,9	30,0	32,4	35,0	
	14,5	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2	20,6	22,1	24,2	26,1	28,0	30,0	32,3	34,9	37,6	
	15,6	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7	22,2	23,8	25,6	28,0	30,2	32,3	34,8	37,6	40,5	
	16,8	16,6	17,9	18,2	20,7	22,3	23,9	25,7	27,6	29,7	32,6	34,8	37,5	40,5	43,7	
	18,0	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9	25,7	27,6	29,6	31,9	34,3	37,5	40,2	45,4	46,8	
	19,5	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9	27,9	29,9	32,2	34,6	37,2	40,0	43,6	47,1	50,8	
	22,0	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3	31,5	33,8	36,4	39,1	42,1	45,3	48,6	52,4	57,6	

Макси- мальна товщина ізоляції	0,33								0,44							
	0,04		0,05						0,07							
50	<i>b/a</i>	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	
	6,9	19,0	20,6	22,1	23,1	25,9	27,4	29,5	31,5	34,3	37,1	47,5	-	47,4	-	
	7,4	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9	36,8	39,8	43,5	47,2	50,9	-	
	8,0	22,1	23,9	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,6	39,9	43,1	47,1	51,1	53,1	65,1	
	8,6	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5	43,0	46,4	50,7	55,0	59,3	68,9	
	9,3	25,8	27,9	30,0	32,3	34,8	37,2	40,0	42,8	46,5	50,3	54,9	59,6	64,2	73,5	
50	10,0	27,8	30,0	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1	50,1	54,1	59,1	64,1	69,1	79,1	
	10,8	30,1	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9	54,2	58,5	63,9	69,3	74,7	85,5	
	11,6	32,3	34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6	58,3	62,9	68,8	75,5	80,4	90,9	
	12,5	34,9	37,6	40,5	43,6	47,0	50,4	54,1	57,9	62,9	67,9	74,1	80,4	86,6	99,1	
	13,5	37,7	40,7	43,8	47,2	50,8	54,5	58,5	62,6	68,0	73,4	80,1	86,0	93,6	107,1	
	14,5	40,5	43,7	47,1	50,6	54,6	58,6	62,9	67,3	74,1	78,9	86,1	93,4	100,6	115,1	
	15,6	43,7	47,1	50,7	54,6	58,8	63,1	67,6	72,4	78,7	84,8	92,7	100,5	103,3	123,9	
	16,8	47,0	50,7	54,6	58,8	63,3	68,0	73,0	78,1	84,4	91,5	99,9	108,3	116,7	133,5	
	18,0	50,4	54,4	56,5	65,0	67,9	72,9	78,3	83,7	90,9	98,1	107,1	116,1	125,1	144,1	
	19,5	54,7	59,0	63,5	68,3	73,6	79,1	84,3	90,8	98,6	106,4	116,1	126,9	135,6	155,1	
	22,0	61,8	66,6	71,7	77,2	83,1	89,1	95,8	102,5	111,3	120,1	131,1	142,1	153,1	-	

Макси- мальна товщина ізоляції	0,27											0,33				
Допуск на мідь	0,02				0,03							0,04				
51	<i>b/a</i>	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	
	25,0	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4	35,8	38,5	41,4	44,6	47,9	51,6	55,4	59,7	64,3	
	26,3	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1	37,7	40,5	43,6	46,9	50,5	54,3	58,3	62,8	67,7	
	28,0	27,8	30,0	32,2	34,7	37,4	40,2	43,8	46,4	50,0	53,8	57,9	62,2	67,0	72,2	
	30,0	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1	43,1	46,3	49,8	53,6	57,7	62,1	66,7	71,9	77,4	
	32,0	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8	46,0	49,4	53,2	57,2	61,6	66,3	71,3	76,8	88,7	
	35,0	34,3	37,6	40,3	43,4	46,9	50,3	54,1	58,2	62,7	67,4	72,6	78,0	81,4	90,6	
	40,0	39,8	43,0	46,1	49,7	53,6	57,6	61,9	66,6	71,7	77,2	83,1	89,3	89,3	96,3	
	45,0	44,8	-	-	55,9	60,4	64,8	69,7	75,0	80,8	86,9	93,6	100,6	108,6	116,9	
	50,0	49,8	53,8	52,7	62,2	67,1	72,1	77,5	83,4	89,8	96,7	104,1	119,9	120,7	130,8	
	55,0	54,8	-	-	-	-	-	85,3	91,8	98,9	106,4	114,6	123,2	132,9	143,2	

Максимальна товщина ізоляції	0,33								0,44							
	0,04		0,05						0,07							
	<i>b/a</i>	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	
	25,0	70,3	75,8	81,5	88,3	94,5	101,4	109,1	116,5	126,6	136,6	149,1	161,6	174,1	190,1	
	26,3	72,7	79,7	85,8	92,3	99,4	106,9	114,3	122,7	133,2	143,8	156,9	170,1	183,0	-	
	28,0	77,5	-	97,3	98,3	105,9	113,9	122,3	130,7	141,9	153,1	167,1	181,1	195,1	-	
	30,0	83,2	-	97,9	105,4	113,5	122,1	131,1	140,1	132,1	164,1	179,1	194,1	209,1	239,1	
	32,0	88,9	-	102,7	110,3	121,1	129,9	139,3	149,5	152,3	175,1	191,1	207,1	-	-	
	35,0	97,4	-	112,5	120,9	132,5	142,6	153,1	163,6	-	191,6	207,1	226,6	-	279,1	
	40,0	111,5	-	128,9	138,5	-	-	-	-	-	219,1	230,1	259,1	279,1	319,1	
	45,0	127,7	-	145,7	156,2	-	-	-	-	-	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	
	50,0	159,8	-	161,7	173,8	-	-	-	-	-	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	
	55,0	154,0	-	178,1	191,5	-	-	-	-	-	301,6	329,1	356,6	384,1	439,1	

### Приклад заповнення паза статора

Припустимо, що в результаті розрахунку число ефективних провідників у пазу статора  $S_n$  дорівнює 10, причому кожен ефективний провідник складається з 4-х елементарних ( $n_b = 2, n_a = 2$ ). Тут  $n_b$  і  $n_a$  – число елементарних провідників в одному ефективному відповідно за шириною  $n_b$  і висотою  $n_a$ .

Нехай вибрали елементарний провідник перерізу  $6,93 \text{ мм}^2$  з розмірами  $a=2,1 \text{ мм}$ ;  $b=3,53 \text{ мм}$  (див. додаток 2).

Розмір міді в ізоляції:

$$a' = a + \Delta + \delta_{iz} = 2,1 + 0,04 + 0,33 = 2,47 \text{ мм};$$

$$b' = b + \Delta + \delta_{iz} = 3,53 + 0,04 + 0,33 = 3,9 \text{ мм},$$

де  $\Delta$  - допуск на мідь, мм;

$\delta_{iz}$  – максимальна товщина ізоляції міді.

Значення  $\Delta$  і  $\delta_{iz}$  беруть з додатку 2.

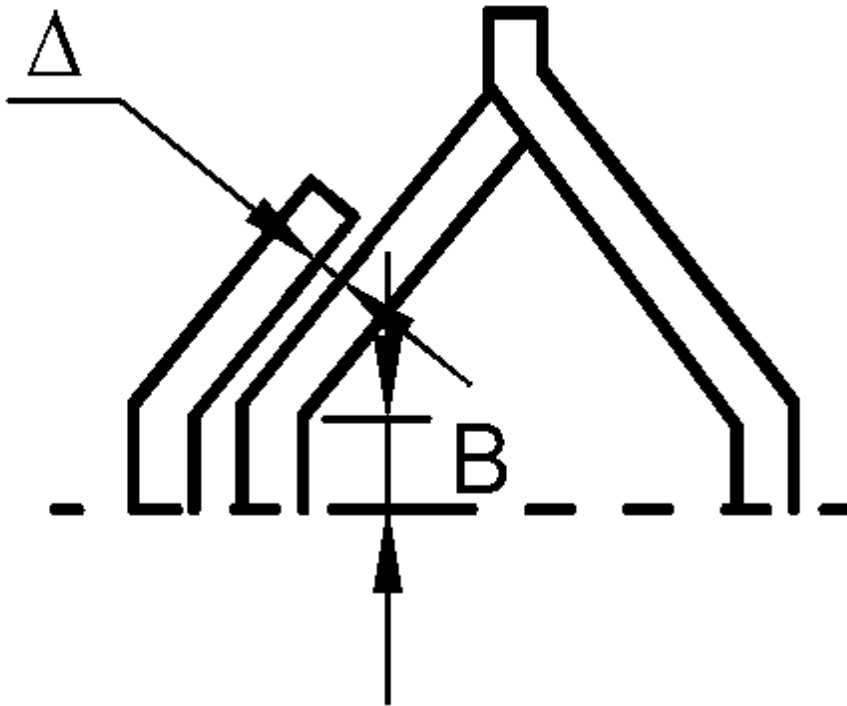
#### Заповнення паза за шириною

1. Мідь ізольована	7,82 мм
2. Допуск на нерівність міді ( $0,15 \div 0,25 \text{ мм}$ )	0,16 мм
3. Міжвиткова ізоляція секції, виконувана з одного шару мікалінти товщиною 0,13 мм у 1/2 нахлесту навколо ефективного провідника	0,52 мм
4. Товщина ізоляції секції за шириною згідно з додатком 1	3,96 мм
Ширина секції	12,46 мм
Короб з кабельного паперу, покритого кремнійорганічною пастою	0,24 мм
Допуск на укладання ( $0,2 \div 0,4 \text{ мм}$ )	0,2 мм
Ширина паза у світлі	12,9 мм
Допуск на штампування ( $+0,3 \text{ мм}$ )	0,3 мм
Ширина паза в штампі	$b_{n_1} = 13,2 \text{ мм}$

#### Заповнення паза за висотою

1. Мідь ізольована	24,7 мм
2. Допуск на нерівність міді ( $0,15 \div 0,25 \text{ мм}$ )	0,7 мм
3. Міжвиткова ізоляція секції, виконувана з одного шару мікалінти товщиною 0,13 мм у 1/2 нахлесту навколо ефективного провідника	2,60 мм
4. Товщина ізоляції секції за шириною згідно з додатком 1	4,07 мм
Висота однієї секції	32,07 мм
Висота двох секцій	64,14 мм
Короб з кабельного паперу, покритого кремнійорганічною пастою	0,36 мм
Прокладка зі склотекстоліту $3 \times 0,5$ (прокл. = 0,5 мм)	1,5 мм
Допуск на укладання ( $0,2 \div 1,0 \text{ мм}$ )	0,2 мм
Висота паза до клина	65,2 мм
Висота клина	3,5 мм
Висота шліца ( $0,6 \div 1,0 \text{ мм}$ )	0,8 мм
Висота паза у світлі	70,5 мм
Висота паза в штампі ( $+0,5$ )	$h_{n_1} = 71,0 \text{ мм}$

## Визначення середньої довжини лобової частини обмотки якоря



$$l_{s1} = \frac{\pi(D_i + h_{n1})\beta}{2p\sqrt{1 - \frac{b_{n1} + \Delta}{t_{z1}}}} + 2B + 1,57h'_{n1},$$

де  $h_{n1}$  – повна висота паза, м;

$h'_{n1}$  – висота паза до клина, м;

$\beta$  – укорочення кроку;

$b_{n1}$  – ширина паза, м;

$t_{z1}$  – зубцовий розподіл у розточенні, м;

$B, \Delta$  - у метрах.

Напруга, В	$\Delta$ , мм	$B$ , мм
2300÷4000	4,5÷5,0	40
4000÷6600	6,5	45

## Розрахунок питомих провідностей потоків розсіювання двошарової обмотки статора

1. Провідність відкритого паза з рівнобіжними стінками:

$$\lambda_{n1} = (1,67 + g) \cdot \frac{h_1}{4b_{n1}} + \frac{h_2}{4b_{n1}} + K'_y \cdot \frac{h_3}{b_{n1}},$$

де  $h_1 = h_{\text{із. секції}} - \Delta_{\text{із. секції}}$ ,

$h_2 = \frac{1}{2} \Delta_{\text{із. секції}} + \delta_{\text{пр}} + \frac{1}{2}$  допуску на укладання,

$h_3 = \frac{1}{2} \Delta_{\text{із. секції}} + \delta_{\text{пр}} + \frac{1}{2}$  допуску на укладання +  $h_{\text{кл}}$ ,

$\delta_{\text{пр}}$  – товщина прокладки між секціями;

$h_{\text{кл}}$  – висота клина і шліці;

$b_{n1}$  – ширина паза статора в штампі;

$g$  – коефіцієнт, що враховує зрушення фаз між струмами у верхніх і нижніх сторонах секцій в пазу;

$\beta$  – укорочення кроку обмотки.

$$\text{Якщо } \beta > \frac{2}{3}, \text{ то } g = \frac{3\beta - 1}{2}; \quad K'_y = \frac{1 - \beta}{2}.$$

2. Провідність по коронках зубців:

$$\lambda_{\kappa 1} = \left[ 0,71 \cdot \lg \frac{t_{z1}}{b_{n1}} + 0,16(q-1) \right] K'_y,$$

де  $t_{z1}$  – зубцовий розподіл статора в розточенні;

$q$  – число пазів на полюс і фазу статора.

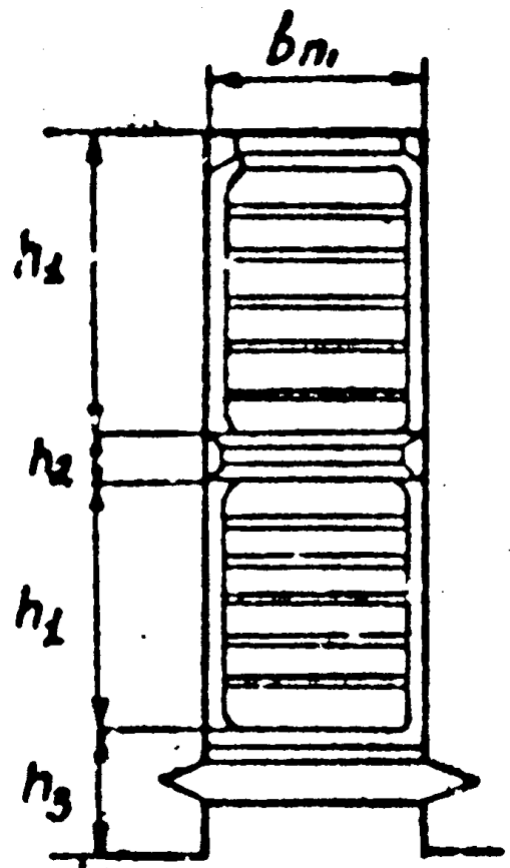
3. Провідність по лобових частинах:

$$\lambda_{s1} = \frac{l_{s1}}{l_i} \cdot q \cdot K_s,$$

для двошарових трифазних обмоток  $K_s = 0,2$ .

4. Повна провідність

$$\sum \lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\kappa 1} + \lambda_{s1}.$$



Таблиця п.6.1 - Крива намагнічування для листової сталі (Ст.3) товщиною 1÷2 мм (для полюсів)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	100									
0,2	140									
0,3	180									
0,4	210									
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	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
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	2650	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	24500	25600	26500	27500
2,0	29000	30200	31500	32800	34200	36100	38000			



Таблиця п.6.2 - Крива намагнічування листової електротехнічної сталі марок 1411, 1412, 1413

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	44	45	48	49	50	51	52	54	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	147	150	154	158	158	162
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	241	262	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640
1,6	5980	6330	6700	7090	7500	7930	8380	8850	9340	9860
1,7	10100	11000	11600	12300	13000	13700	14500	15300	16200	17200
1,8	18100	19100	20200	21400	22700	24700	25600	27200	29000	31100
1,9	33500	36300	39700	43700	48300	53700	59700	66200	73200	80600
2,0	88300	96100	104000	112000	120000	128000	136000	144000	151000	159000
2,1	167000	175000	183000	191000	199000	207000	215000	223000	231000	239000
2,2	246000	254000	262000	270000	278000	286000	294000	302000	310000	318000
2,3	426000	337000	342000	350000	352000	365000	373000	381000	389000	397000
2,4	405000	414000	421000	429000	437000	445000				

Таблиця п.6.3 - Крива намагнічування для листової електричної сталі марок 1511, 1512, 1513

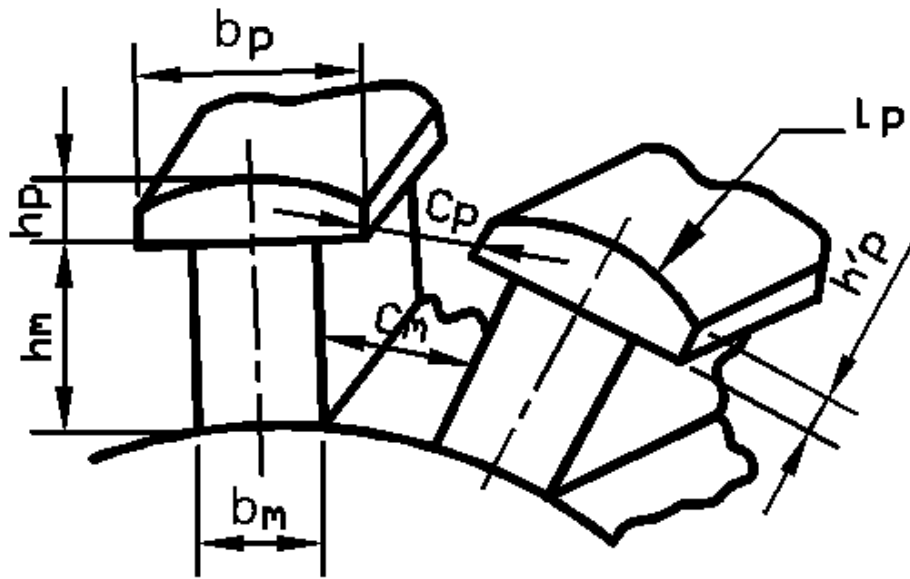
B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	96	97	98	99	100	103	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	283	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1,0	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	695	707
1,2	730	753	780	810	840	870	900	940	980	1030
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1,4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1,6	6700	7100	7600	8800	8650	9300	10000	10700	11700	12200
1,7	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000
1,8	23000	24000	25000	26000	27000	28000	29000	30000	31200	32500
1,9	34000	35500	37000	38500	40500	42500	45000	51000	57000	63000
2,0	70000	77000	84500	91000	100000	108000	116000	124000	138000	140000
2,1	148000	156000	164000	172000	180000	188000	196000	204000	212000	220000
2,2	228000	236000	244000	252000	260000	268000	276000	284000	292000	300000

Примітка. Для індукції більш ніж 2,06 Тл крива намагнічування виражається рівнянням  $H = (1,9140 + 1,266B) \cdot 10^6$

Таблиця п.6.4 - Основна крива намагнічування для сталі марки 2411

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	66	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	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	390	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	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2100	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	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	68000	77000	86000	95000	104000	113000	122000	131000	140000
2,1	149000	158000	167000	176000	185000	194000	203000	212000	221000	230000
2,2	239000	248000	257000	266000	275000	284000	293000	302000	311000	320000
2,3	329000	338000	347000	356000	365000	374000	383000	392000	401000	410000
2,4	419000	428000	437000	446000	455000	464000	473000	482000	491000	500000

## Визначення розсіювання полюсів



а) провідність полюсних башмаків (див. ескіз)

$$\lambda_p = \frac{5h'_p}{C_p} (l_p + b_p),$$

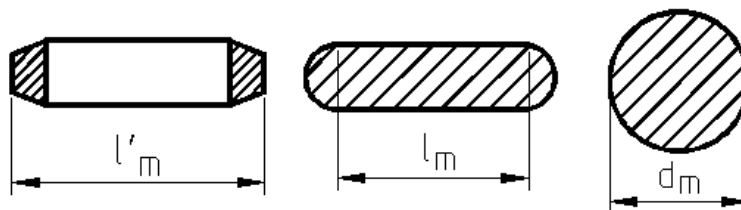
де  $h'_p = h_p - \frac{0,35\tau}{p}$ ;  $C_p = \tau - b_p$ ;  $C_p, h'_p, l_p, b_p$ ;

б) провідність полюсних осердь:

прямокутних  $\lambda_m = \frac{1,8(h_m - h_i)}{C_m} \cdot (l'_m - b_m)$ ;

овальних  $\lambda_m = \frac{1,8(h_m - h_i)}{C_m} \cdot (l_m - 1,57b_m)$ ;

круглих  $\lambda_m = \frac{2,8(h_m - h_i)}{C_m} \cdot d_m$ ;



$$C_m = \frac{\pi(D_i - 2\delta - 2h_p - h_m + h_i)}{2p} - b_m,$$

де  $h_i$  – товщина ізоляційної рамки внизу полюса, см,  $h_i = 0,2$  см;

$$\lambda_{mp} = \lambda_m + \lambda_p.$$

## Список літератури

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин.-М.: Энергия, 1980.

Навчальне видання

ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,  
ФІНКЕЛЬШТЕЙН Володимир Борисович,  
ЧЕРНЯВСЬКА Маргарита Василівна

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи «Розрахунок трифазної синхронної машини» з дисципліни «Електричні машини» (для студентів усіх форм навчання напряму 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”).

Відповідальний за випуск *І. О. Махов*  
Редактор *З. І. Зайцева*  
Комп’ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 261М

Підп. до друку 12. 05. 2010  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60 x 84 1/16  
Ум. друк. арк. 3,5  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювачі  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rektorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rektorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:  
ДК №731 від 19.12.2001