

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



О. Ю. Юр'єва, Л. В. Шилкова, Д. В. Потоцький

ПРОЄКТУВАННЯ СИНХРОННИХ ЯВНОПОЛЮСНИХ МАШИН

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
З КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Харків 2020

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

О. Ю. Юр'єва, Л. В. Шилкова, Д. В. Потоцький

**ПРОЄКТУВАННЯ
СИНХРОННИХ ЯВНОПОЛЮСНИХ
МАШИН**

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
З КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ

для студентів, що навчаються за спеціальністю
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 30.10.20.

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

УДК 621.313
Ю 85

Рецензенти: *В. Є. Плюгін*, д-р техн. наук, професор, Харківська національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;

В. В. Шевченко, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Юр'єва О. Ю.

Ю 85 Проектування синхронних явнополюсних машин : навчально-методичний посібник з курсового проектування для студентів, що навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О. Ю. Юр'єва, Л. В. Шилкова, Д. В. Потоцький. – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – 72 с.

ISBN

Навчально-методичний посібник містить методичне забезпечення, яке необхідно для проектування синхронних явнополюсних машин, їх розрахункової та конструкторської розробки при виконанні курсового або дипломного проєкту.

Розраховано на студентів для студентів, що навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Іл. 53. Табл. 24. Бібліогр.: 12 назв.

УДК 621.313

ISBN

© О. Ю. Юр'єва, Л. В. Шилкова, Д. В. Потоцький, 2020

ВСТУП

З усіх електричних машин найбільшою та найменшою є саме синхронна машина. Найбільшою електричною машиною є генератор теплової електростанції потужністю 1,75 ГВт, а найменшою – двигун кулера комп'ютера потужністю 4 Вт. Такий діапазон потужностей та широке застосування привели до появи низки окремих типів синхронних машин: турбогенераторів, гідрогенераторів, дизель-генераторів, синхронних двигунів, синхронних компенсаторів, крокових, гістерезисних, реактивних синхронних двигунів.

У швидкохідних синхронних машинах ротори мають неявнополюсне виконання, при відносно малих частотах обертання – явнополюсне. В явнополюсному виконанні виготовляються синхронні генератори, синхронні двигуни, синхронні компенсатори.

Синхронні генератори застосовуються в пересувних та стаціонарних електричних станціях, та приводяться до обертання двигунами внутрішнього згоряння або гідравлічними турбінами. Синхронні двигуни застосовуються в установках, які не потребують регулювання частоти обертання або потребують підтримування постійної частоти обертання при навантаженні, що змінюється. У синхронних двигунів з обмоткою збудження є унікальна властивість – генерувати реактивну потужність в електричних установках для підвищення коефіцієнта потужності мережі. Для цього ж використовують синхронні компенсатори, які встановлюються на підстанціях електричних мереж.

Конструктивні форми синхронних явнополюсних машин визначаються умовами монтажу, характером зовнішнього середовища, системою вентиляції, умовами обслуговування [1–3].

Метою курсового проекту є ознайомлення студента з методами проектування синхронних машин, використання здобутих ним знань для розв'язання реальної інженерної задачі, а також отримання навичок самостійної роботи.

Курсовий проект складається з розрахункової та графічної частин.

Розрахункова частина має бути викладена у вигляді пояснювальної записки на аркушах паперу формату А4 (297 x 210 мм) і зброшурована разом з рисунками (осердя статора, схема обмотки статора, заповнення паза, полюс, заповнення міжполюсного вікна, характеристики синхронної машини). Конструктивні елементи машини приводяться на рисунках з дотриманням масштабу. Пояснювальна записка оформляється відповідно до вимог стандартів [5, 12]. При використанні літерних позначень величин слід керуватися [4]. Позначення одиниць фізичних величин виконувати згідно [10, 11].

Графічна частина проєкту містить кресленики поздовжнього та поперечного розрізів і деяких вузлів і деталей машини. Всі кресленики мають виконуватися відповідно до вимог стандартів [6–9]. Специфікації до креслеників виконують на окремих аркушах формату А4 і підшивають в кінці пояснювальної записки.

Кожен студент отримує індивідуальне завдання на проєктування синхронного генератора або двигуна у вигляді технічних умов. Завдання містить номінальні дані синхронної машини, вимоги до конструктивного виконання, до ступеню захисту від зовнішніх впливів, способу охолодження, кліматичних умов і категорії розміщення.

Проєктування синхронної машини складається з основних етапів: визначення головних розмірів, проєктування статора, проєктування ротора, визначення характеристик, конструювання синхронної машини. Конструювання виконується одночасно з розрахунком синхронної машини для можливості корегування обраних геометричних розмірів за конструктивними міркуваннями. Кожний конструктивний елемент з отриманими геометричними розмірами має відображатися на креслениках синхронної машини.

Під час проєктування необхідно користуватись рекомендованою літературою, заводськими та іншими матеріалами. У процесі проєктування синхронної машини необхідно звертати увагу не тільки на особливості конструкції окремих деталей або вузлів машини, а також на технологію її виготовлення [5, 10, 12].

Результати розрахунків та конструювання за кожним розділом курсового проєкту мають бути надані для перевірки керівнику. Це дає можливість вчасно виправити можливі помилки й організувати рівномірну роботу над проєктом протягом заданого терміну.

1. ТЕХНІЧНІ УМОВИ

1.1. Вихідні дані для проектування синхронної явнополюсної машини

Найменування синхронної машини (синхронний генератор, синхронний двигун).

Номінальна потужність: для генератора – повна потужність S_N , кВ·А, для двигуна – потужність на валу P_N , кВт.

Номінальна (лінійна) напруга U_N , кВ.

Кількість фаз обмотки статора m_s .

Схема з'єднання фазних обмоток статора – Y (зірка).

Номінальна (синхронна) частота обертання n_N , об/хв.

Частота мережі f , Гц.

Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_N$.

Гарантований номінальний ККД η_N .

Номінальний режим роботи відповідно до ГОСТ 183.

Ступінь захисту від зовнішніх впливів відповідно до ГОСТ 14254.

Спосіб охолодження відповідно до ГОСТ 20459.

Виконання за способом монтажу відповідно до ГОСТ 2479.

Кліматичні умови і категорія розміщення відповідно до ГОСТ 15150.

1.2. Додаткові розрахункові дані для проектування синхронної явнополюсної машини

$$\text{Кількість пар полюсів } p = \frac{60f}{n_N}.$$

Розрахункова електромагнітна потужність для номінального режиму, кВ·А:

$$\text{➤ для генератора } S_{em\ nom} = S_N,$$

$$\text{➤ для двигуна } S_{em\ nom} = \frac{P_N}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N}.$$

Номінальна фазна напруга обмотки статора при з'єднанні фазних обмоток

$$\text{статора за схемою «зірка», В, } U_{sN} = \frac{U_N \cdot 10^3}{\sqrt{3}}.$$

1.3. Базові синхронні явнополюсні машини

У даному посібнику міститься методика проектування синхронних трифазних ($m_s = 3$) явнополюсних машин.

Базовими машинами для проектування є синхронні генератори потужністю від 300 до 4000 кВ·А та синхронні двигуни потужністю від 300 до 4000 кВт. Синхронні генератори виконуються на напругу 380, 660, 6300 В. Синхронні двигуни виконуються на напругу 380 та 6300 В. Синхронні генератори та двигуни виконуються зі з'єднанням фазних обмоток за схемою «зірка». Синхронні генератори та двигуни призначені для роботи з мережею частотою $f = 50$ Гц у тривалому режимі S1. Базові синхронні машини мають частоту обертання 300, 375, 500, 600, 750 та 1000 об/хв та висоту осі обертання 630 мм. Синхронні генератори розраховуються на номінальний режим роботи з коефіцієнтом потужності 0,8 (що відстає), а двигуни – з коефіцієнтом 0,9 (що випереджає).

Базові синхронні машини мають ступінь захисту від зовнішніх впливів IP23 – із захистом від проникнення всередину машини твердих тіл розміром, більшим за 12 мм, та захистом від крапель дощу; за способом охолодження IC01 – захищена машина із самовентиляцією; за способом монтажу IM7311 – на двох стоякових підшипниках, встановлених разом зі зварною станиною на фундаментній плиті; виконання за кліматичними умовами та категорією розміщення У4 – для встановлення у вентиляваних виробничих приміщеннях в районах з помірним кліматом. Нагрівостійкість ізоляції відповідає класу В.

В синхронних генераторах та двигунах використовується тиристорна система збудження.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

2.1. Машинна стала (стала Арнольда), $\text{мм}^3 \cdot (\text{об/хв}) / (\text{кВ} \cdot \text{А})$,

$$C_A = \frac{6,1 \cdot 10^{10}}{\alpha_e \cdot k'_f \cdot K'_{Ws} \cdot A'_s \cdot B'_\delta},$$

де α_e – еквівалентний коефіцієнт дуги полюса, для багатополюсних машин знаходиться в межах 0,65–0,75;

k'_f – попереднє значення коефіцієнта форми магнітного поля збудження, для явнополюсних машин знаходиться в межах 1,08–1,15;

K'_{Ws} – попереднє значення обмоткового коефіцієнта обмотки статора, для двошарових обмоток зі скороченням кроку обмотки на 0,83 полюсного кроку приблизно дорівнює 0,92;

A'_s – попереднє значення лінійного навантаження, для зазначених синхронних машин становить 340–570 А/см;

B'_δ – попереднє значення магнітної індукції в повітряному проміжку, для зазначених синхронних машин становить 0,72–0,9 Тл.

Для вибору величин A'_s та B'_δ можна скористуватись даними спроектованих раніше синхронних машин, що наведені в додатку А.

2.2. Попереднє значення внутрішнього діаметра осердя статора, мм,

$$d'_s = \sqrt[3]{\frac{120f \cdot C_A \cdot k_e \cdot S_{em\ nom}}{\pi \cdot \lambda \cdot n_N^2}},$$

де k_e – коефіцієнт відношення ЕРС у фазі обмотки статора до номінальної фазної напруги, для генераторів приймається 1,08, для двигунів – 1,0–1,06;

λ – відношення внутрішнього діаметра статора до розрахункової довжини осердя статора, вибирається з рис. 2.1. Якщо машина проектується вперше, обирається три значення λ (мінімальне, середнє, максимальне), розрахунок ведеться за трьома значеннями одночасно, доки не визначиться кращий варіант.

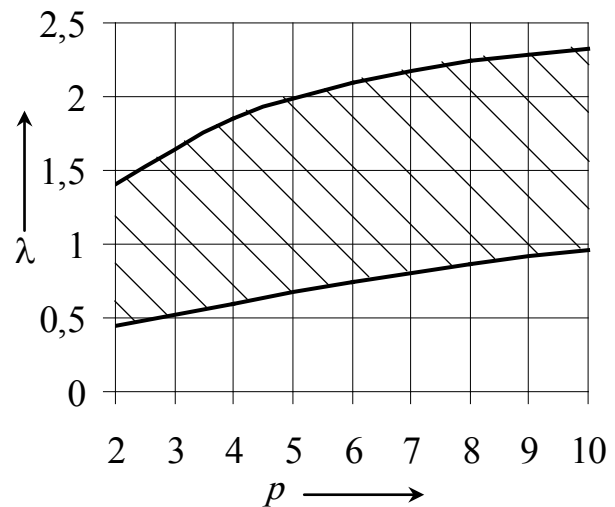


Рисунок 2.1 – Діапазон змінювання λ залежно від p

2.3. Попереднє значення зовнішнього діаметра осердя статора, мм,

$$d'_{se} = k_{ds} \cdot d'_s,$$

де k_{ds} – коефіцієнт співвідношення зовнішнього та внутрішнього діаметрів осердя статора, знаходиться з табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт k_{ds}

p	3	4	5	6	8	10
k_{ds}	1,40–1,45	1,30–1,40	1,25–1,35	1,23–1,33	1,18–1,24	1,15–1,24

Для кожного з трьох знайдених значень d'_s визначають d'_{se} , а потім заокруглюють їх до найближчих нормалізованих значень d_{se} , які надані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Нормалізовані значення d_{se}

Габарит	16	17	18	19
d_{se} , мм	1180	1430	1730	2150

Зовнішні діаметри нормалізовано для найвигіднішого розкрою листів електротехнічної сталі, при якому виходять найменші відходи при штампуванні.

2.4. Уточнене значення внутрішнього діаметра осердя статора, мм,

$$d_s = \frac{d_{se}}{k_{ds}}.$$

Значення діаметра d_s заокруглюють до найближчого цілого числа, що закінчується цифрою 0 або 5.

2.5. Полісний крок, мм, $\tau_p = \frac{\pi d_s}{2p}$.

2.6. Розрахункова довжина осердя статора, мм, $l_\delta = \frac{C_A \cdot S_{em\ nom}}{d_s^2 \cdot n_N}$.

2.7. Кількість пакетів осердя статора (повинна дорівнювати цілому числу)

$$n_v = \frac{l_\delta + b_k}{l_{ps} + b_k},$$

де b_k – ширина вентиляційного каналу, зазвичай дорівнює 10 мм;

l_{ps} – довжина пакета осердя статора з радіальною системою вентиляції, зазвичай l_{ps} дорівнює 40, 45 або 50 мм. З трьох величин l_{ps} обирається та, при якій n_v максимально наближується до цілого числа.

2.8. Загальна довжина осердя статора, мм,

$$l_s = l_{ps} \cdot n_v + b_k(n_v - 1).$$

2.9. Ефективна довжина осердя статора, мм,

$$l_{ef} = k_{Fes} \cdot n_v \cdot l_{ps},$$

де k_{Fes} – коефіцієнт заповнення пакету осердя статора сталлю, 0,97 для оксидованих листів електротехнічної сталі за товшки 0,5 мм.

2.10. Розміри осердя статора наведено на рис. 2.2.

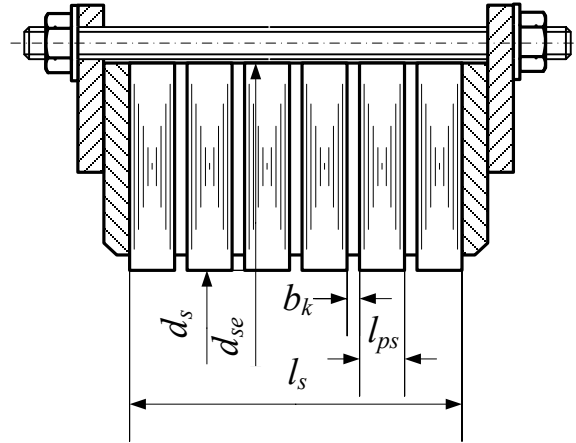


Рисунок 2.2 – Осердя статора

3. ПРОЄКТУВАННЯ СТАТОРА

3.1. Вибір типу обмотки

У синхронних машинах середньої і великої потужності, що проєктуються на напругу 380 В і більше, зазвичай застосовується двошарова петльова обмотка статора з укороченим кроком $y_{Qs} = \frac{5}{6} \tau_p$, яка складається з шаблонних багатополосових (жорстких) секцій з провідників прямокутного перерізу. Секції обмотки укладають у відкриті пази осердя статора. Кількість ефективних провідників в пазу $z_{Qs} \geq 4$.

3.2. Кількість пазів на полюс і фазу

$$q_s = \frac{\pi d_s}{2p \cdot m_s \cdot \tau'_s},$$

де τ'_s – попереднє значення пазового кроку статора по внутрішньому діаметру, обирається за табл. 3.1.

Кількість пазів на полюс і фазу при $2p < 8$ частіше за все вибирають цілим, $q_s = 3, 4, 5$. При $2p \geq 8$ з метою наближення форми кривої розподілу ЕРС у часі до синусоїди бажано вибрати число q_s дробовим $\left(1\frac{1}{4} < q_s < 4\frac{1}{2}\right)$.

Таблиця 3.1 – Рекомендовані значення пазового кроку статора τ_s

τ_p , мм	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	700–800
τ_s , мм	15–29	17–32	20–32	25–39	30–43	35–46	40–50

Рекомендується знайти діапазон q_s , що відповідає діапазону τ_s .

Зіставивши отримані значення q_s з відповідними для подібних машин (див. додаток А), вибрати остаточний варіант.

3.3. Кількість пазів статора

$$Q_s = 2p \cdot m_s \cdot q_s.$$

Вибір кількості пазів на полюс і фазу q_s і кількості пазів статора Q_s істотно впливає на техніко-економічні характеристики машини (витрата ізоляції, форма кривих МРС і ЕРС обмотки, міцність зубців, перепад температури в ізоляції, додаткові втрати, технологічність виготовлення обмотки).

3.4. Сегментування осердя статора

Якщо діаметр d_{se} більший, ніж 990 мм, то осердя шихтується з окремих сегментів.

При діленні осердя статора на окремі сегменти виходять з технологічних міркувань: відходи електротехнічної сталі при штампуванні сегментів осердя статора повинні бути мінімальними. Сегменти осердя статора штампуються з рулонів електротехнічної холоднокатаної ізотропної сталі шириною 500, 530, 600, 670, 740, 750, 805, 815, 825, 840, 860, 865, 880, 905, 935, 965, 985, 990 мм, товщиною 0,5 мм марок 2211, 2312, 2411, 2412 (ГОСТ 21427.2) (рис. 3.1).

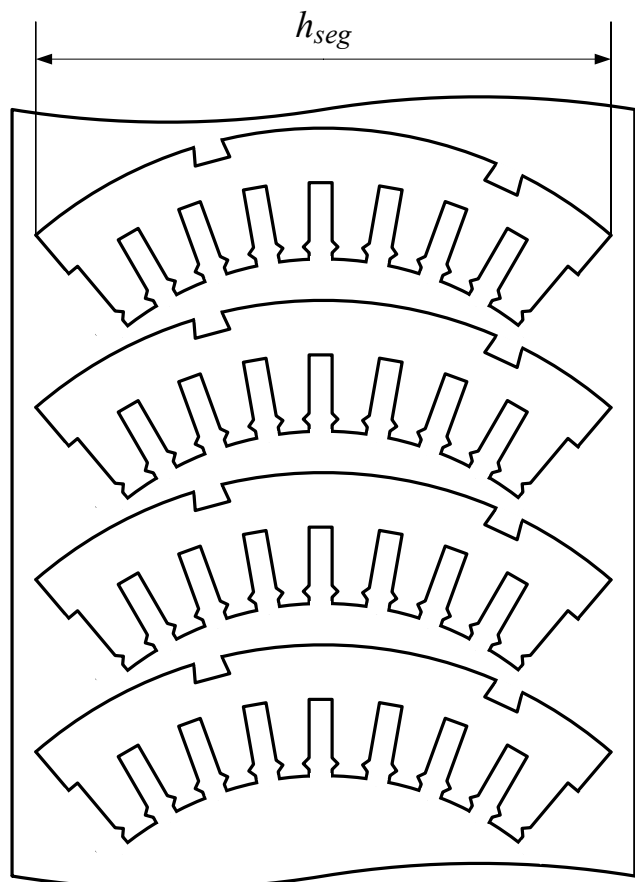


Рисунок 3.1 – Розкрій листів електротехнічної сталі

Велика хорда сегмента

$$h_{seg} = d_{se} \cdot \sin\left(180 \cdot \frac{Q_{seg}}{Q_s}\right),$$

де Q_{seg} - кількість пазових кроків в сегменті, обирається цілим, тому що стик двох сегментів має проходити по центру паза (із зазором 0,4–0,6 мм).

Величина h_{seg} має бути меншою за ширину листа електротехнічної сталі на 8–12 мм. Для виконання цієї умови необхідно добирати величину Q_{seg} .

Крім того, величина Q_{seg} впливає на кількість сегментів в повному колі статора $s = \frac{Q_s}{Q_{seg}}$.

При цілій кількості сегментів s застосовують нормальне шихтування (шихтування замкнутими шарами), а при дробовій кількості сегментів s – гвинтове шихтування (шихтування безперервною висхідною спіраллю).

Дробову кількість сегментів s виражають правильним дробом. Кількість пазових кроків в сегменті Q_{seg} має бути кратною знаменнику цього дробу.

При нормальному шихтуванні і парному числі Q_{seg} стики кожного подальшого шару зсуваються на 1/2 сегменту, а при непарному і кратному трьом – на 1/3 сегменту.

Сегменти з хордою $h_{seg} < 490$ мм утримуються двома шпильками, а сегменти з $h_{seg} \geq 490$ мм – трьома і більше.

3.5. Перевірка умов симетрії обмотки статора

3.5.1. При цілому q_s :

$$\frac{Q_s}{m_s \cdot a_s} = \text{цілому числу}; \quad \frac{2p}{a_s} = \text{цілому числу},$$

де a_s – кількість паралельних віток обмотки статора, обирається таким, що дорівнює 1, 2, 3, 4.

3.5.2. При дробовому q_s його число надають як суму цілої частини b і нескоротного правильного дробу $\frac{c}{d}$, тобто

$$q_s = b + \frac{c}{d} = \frac{b \cdot d + c}{d} = \frac{g}{d}.$$

Обмотка статора буде симетричною, якщо

$$\frac{d}{m_s} \neq \text{цілому числу}; \quad \frac{Q_s}{g} = \text{цілому числу}; \quad \frac{2p}{a_s \cdot d} = \text{цілому числу}.$$

3.6. Крок обмотки статора, виражений у пазових кроках,

$$y_{Q_s} = \beta'_Q \cdot m_s \cdot q_s,$$

де β'_Q – попереднє значення відносного кроку обмотки статора, як частка полюсного кроку, попередньо приймається 0,8.

Знайдене y_{Q_s} заокруглюється до цілого числа.

3.7. Відносний крок обмотки статора $\beta_Q = \frac{y_{Q_s}}{m_s \cdot q_s}$.

3.8. Коефіцієнт скорочення кроку обмотки статора $K_p = \sin(\beta_Q \cdot 90^\circ)$.

3.9. Коефіцієнт розподілу обмотки статора:

➤ якщо q_s – ціле число,

$$K_d = \frac{\sin \frac{90^\circ}{m_s}}{q_s \cdot \sin \frac{90^\circ}{m_s \cdot q_s}};$$

➤ якщо q_s – дробове число,

$$K_d = \frac{\sin \frac{90^\circ}{m_s}}{g \cdot \sin \frac{90^\circ}{m_s \cdot g}}.$$

3.10. Обмотувальний коефіцієнт обмотки статора

$$K_{W_s} = K_p \cdot K_d.$$

3.11. Попереднє значення основного магнітного потоку, Вб,

$$\Phi'_\delta = B'_\delta \cdot \alpha_e \cdot \tau_p \cdot l_s \cdot 10^{-6}.$$

Рекомендується результат обчислень величини основного магнітного потоку записувати як деяке число, помножене на 10^{-2} ; наприклад, $\Phi'_\delta = 4,7 \cdot 10^{-2}$ Вб.

3.12. Попереднє значення кількості витків у фазній обмотці статора

$$N'_s = \frac{k_e \cdot U_{sN}}{4,44 K_{W_s} \cdot f \cdot \Phi'_\delta}.$$

3.13. Кількість ефективних провідників в пазу статора

$$z_{Qs} = \frac{a_s \cdot N'_s}{p \cdot q_s}.$$

Знайдене z_{Qs} заокруглюють до найближчого цілого парного числа, причому $z_{Qs} \geq 4$. Щоб уникнути грубих заокруглень при $a_s = 1$, рекомендується переходити на варіанти обмотки статора з $a_s = 2, 3, 4$.

3.14. Остаточне прийняте значення кількості витків у фазній обмотці статора

$$N_s = \frac{z_{Qs} \cdot p \cdot q_s}{a_s}.$$

3.15. Уточнене значення основного магнітного потоку, Вб,

$$\Phi_\delta = \frac{k_e \cdot U_{sN}}{4,44 K_{Ws} \cdot f \cdot N_s}.$$

3.16. Магнітна індукція в повітряному проміжку, Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_e \cdot \tau_p \cdot l_s} \cdot 10^6.$$

Отримане значення B_δ не має відрізнятися від раніше вибраного в п. 2.1 більш ніж на $\pm 10\%$.

При невиконанні умови необхідно змінити довжину осердя статора.

3.17. Номінальний струм фазної обмотки статора, А,

$$I_{sN} = \frac{S_{em\ nom}}{3U_{sN}} \cdot 10^3.$$

3.18. Номінальний струм паралельної вітки фазної обмотки статора, А,

$$I_{asN} = \frac{I_{sN}}{a_s}.$$

Величина I_{asN} не має перевищувати 200 А.

3.19. Лінійне навантаження, А/см,

$$A_s = \frac{I_{asN} \cdot z_{Qs} \cdot Q_s}{\pi d_s} \cdot 10.$$

Отримане значення A_s не має відрізнятися від раніше вибраного в п. 2.1 більш ніж на $\pm 10\%$. При невиконанні умови необхідно змінити кількість витків N_s , змінюючи або не змінюючи кількість пазів Q_s .

Після остаточного вибору B_{δ} та A_s величини Q_s , q_s , a_s та N_s можна вважати остаточно прийнятими.

3.20. Побудова схеми обмотки статора

При цілому q_s побудова схеми обмотки статора виконується за загальними правилами побудови схем багатofазних двошарових обмоток.

При дробовому q_s для полегшення побудови схеми обмотки рекомендується скласти таблицю розподілу секцій і груп по фазах (табл. 3.2).

Така таблиця складається з $2p$ рядків і m_s великих стовпчиків, кожен з яких складається з g маленьких стовпчиків. До отриманих клітинок вписують в послідовному порядку номери пазів з кроком d . Складена таблиця дає розподіл (чергування) сторін секцій у верхньому шарі обмотки. Сторони секцій нижнього шару зсунуті на величину y_{Qs} . Номери пазів у великих стовпчиках указують на сторони секцій верхнього шару, які належать до відповідної фази.

В табл. 3.2 наведено приклад розподілу секцій для обмотки статора з такими даними:

$$m_s = 3, 2p = 4, Q_s = 15, a_s = 1, y_{Qs} = 3, q_s = 1\frac{1}{4} = \frac{1 \cdot 4 + 1}{4} = \frac{5}{4}, g = 5, d = 4.$$

Таблиця 3.2 – Розподіл секцій і груп по фазах

Позначення полюсів	Фази													
	A				B				C					
N_1	1			2				3				4		
S_1		5			6				7				8	
N_2			9			10				11				12
S_2				13			14				15			
Кількість секцій на фазу	5				5				5					
Чергування груп	2 – 1 – 1 – 1				1 – 2 – 1 – 1				1 – 1 – 2 – 1					

3.21. Попереднє значення пазового кроку осердя статора в розрахунку-

вому перерізі (на $1/3$ висоти від розточки статора), мм,

$$\tau'_{s\ 1/3} = \frac{\pi \left(d_s + \frac{2}{3} h'_s \right)}{Q_s},$$

де h'_s – попереднє значення висоти паза статора, яке приймається з діапазону 60–80 мм.

3.22. Попереднє значення ширини зубця в розрахунковому перерізі, мм,

$$b'_{ts\ 1/3} = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_e \cdot m_s \cdot q_s \cdot l_{ef} \cdot B'_{ts\ 1/3}} \cdot 10^6,$$

де $B'_{ts\ 1/3}$ – попереднє максимальне значення магнітної індукції зубця статора в розрахунковому перерізі, яке обирається з діапазону 1,4–1,7 Тл.

3.23. Попереднє значення ширини паза статора, мм,

$$b'_s = \tau'_{s\ 1/3} - b'_{ts\ 1/3}.$$

3.24. Попереднє значення густини струму в обмотці статора для середніх і крупних синхронних машин захищеного виконання з радіальною системою вентиляції J'_s обирається з діапазону 4,5–6 А/мм². Верхня межа стосується швидкохідних машин, а нижня – тихохідних.

3.25. Площа поперечного перерізу ефективного провідника (витка) обмотки статора, мм²,

$$S_{s\ ef} = \frac{I_{asN}}{J'_s}.$$

3.26. Кількість елементарних провідників

Якщо площа поперечного перерізу ефективного провідника більша за 20 мм², то його необхідно розбивати на N_{el} елементарних провідників. Розбивати ефективний провідник на елементарні можна по ширині та по висоті:

$$N_{el} = N_{elh} \cdot N_{elb},$$

де N_{elh} – кількість елементарних провідників по висоті паза, зазвичай 1–4;

N_{elb} – кількість елементарних провідників по ширині паза, зазвичай 1 або 2.

Якщо площа поперечного перерізу ефективного провідника менша за 20 мм², то ефективні провідники на елементарні не поділяються, тобто $N_{elh} = 1$ та $N_{elb} = 1$.

3.27. Попереднє значення площі поперечного перерізу елементарного провідника, мм^2 ,

$$S'_{sel} = \frac{S_{sef}}{N_{el}}.$$

3.28. Попередня ширина елементарного неізолюваного провідника обмотки статора, мм ,

$$b'_{sel} = \frac{b'_s - (\delta_{cb} + \Delta_1 + \Delta_2)}{N_{elb}} - \delta'_{isb},$$

де δ_{cb} – двобічна товщина ізоляції секції по ширині паза, приймається 3,27 мм ;

Δ_1 – допуск на штампування, дорівнює 0,3 мм ;

Δ_2 – допуск на укладання секції, знаходиться в межах 0,2–0,3 мм ;

δ'_{isb} – попереднє значення двобічної товщини ізоляції обмотувального проводу по ширині, попередньо приймається 0,33 мм .

3.29. За знайденими попередніми значеннями S'_{sel} та b'_{sel} вибрати стандартні значення розмірів елементарного провідника $a_{sel} \times b_{sel}$ та площу його поперечного перерізу S_{sel} (табл. 3.3).

При виборі розмірів $a_{sel} \times b_{sel}$ для зменшення додаткових втрат від вихрових струмів в обмотці статора та за технологічними вимогами необхідно, щоб виконувались умови:

$$a_{sel} \leq 3,55 \text{ мм}; \quad b_{sel} \leq 7,1 \text{ мм}; \quad \frac{b_{sel}}{a_{sel}} > 1,05.$$

Якщо умови не виконуються, необхідно змінити величини N_{elh} та N_{elb} .

3.30. Вибір ізоляції обмотки статора

Ізоляція обмотки статора в цілому складається з двох частин: виткової ізоляції та корпусної ізоляції.

Витковою ізоляцією є ізоляція проводу, з якого виконано секції обмотки статора. Для синхронних машин зазначеної потужності використовують провід марок ПСД, ПСДК та ПЭТВСД. Значення двобічної товщини ізоляції по меншій стороні обмотувального проводу δ_{isa} та по більшій стороні обмотувального проводу δ_{isb} залежно від марки наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.3 – Розміри та перерізи мідного дроту по ГОСТ 434

$b_{s\,eb}$ мм	$a_{s\,eb}$ мм													
	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70
	Розрахунковий переріз $S_{s\,eb}$ мм ²													
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	–	–	–
2,12	1,559	–	1,734	–	1,905	–	2,160	–	2,435	–	2,753	3,145	3,369	–
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	–	3,561	–
2,36	1,751	–	1,950	–	2,145	–	2,429	–	2,735	–	3,089	3,535	3,785	3,887
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	–	4,025	–
2,65	1,983	–	2,211	–	2,435	–	2,753	–	3,098	–	3,495	3,985	4,265	4,397
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	–	4,585	–
3,00	2,263	–	2,526	–	2,785	–	3,145	–	3,535	–	3,985	4,510	4,825	4,992
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	–	5,145	–
3,35	2,543	–	2,841	–	3,135	–	3,537	–	3,973	–	4,475	5,110	5,465	5,675
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	–	5,785	–
3,75	2,863	–	3,201	–	3,535	–	3,985	–	4,473	–	5,035	5,785	6,185	6,437
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	–	6,585	–
4,25	3,263	–	3,651	–	4,035	–	4,545	–	5,098	–	5,735	6,535	6,985	7,287
4,5	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,098	5,410	5,725	6,085	–	7,385	–
4,75	3,663	–	4,101	–	4,535	–	5,105	–	5,723	–	6,435	7,285	7,785	8,137
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	–	8,265	–
5,30	4,103	–	4,596	–	5,085	–	5,721	–	6,410	–	7,205	8,185	8,745	9,157
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	–	9,385	–
6,00	4,663	–	5,226	–	5,785	–	6,505	–	7,285	–	8,185	9,235	9,865	10,35
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	–	10,51	–
6,70	–	–	5,856	–	6,486	–	7,289	–	8,160	–	9,160	10,44	11,15	11,71
7,10	–	–	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	–	11,79	–
7,50	–	–	–	–	7,285	–	8,185	–	9,160	–	10,29	11,79	12,59	13,24
8,00	–	–	7,2	–	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	–	13,39	–

Закінчення табл. 3.3

b_{sel} мм	a_{seb} мм												
	1,80	1,9	2,00	2,12	2,14	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55
Розрахунковий переріз S_{seb} мм ²													
2,36	4,137	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,50	4,407	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,65	4,677	4,957	5,237	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,80	5,038	–	5,638	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,0	5,307	5,622	5,937	6,315	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,15	5,667	–	6,337	–	6,693	–	–	–	–	–	–	–	–
3,35	6,027	6,382	6,737	7,163	7,141	–	–	–	–	–	–	–	–
3,55	6,387	–	7,137	–	7,589	7,829	8,326	–	–	–	–	–	–
3,75	6,837	7,237	7,637	8,117	8,037	–	8,826	–	–	–	–	–	–
4,00	7,287	–	8,137	–	8,597	8,891	9,151	10,05	10,65	–	–	–	–
4,25	7,737	8,187	8,637	9,177	9,157	–	10,08	–	11,35	–	–	–	–
4,5	8,183	–	9,137	–	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	–	–
4,75	8,637	9,137	9,637	10,24	10,28	–	11,33	–	12,75	–	14,41	–	–
5,00	9,177	–	10,24	–	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20
5,30	9,717	10,28	10,84	11,51	11,51	–	12,70	–	14,29	–	16,15	–	18,27
5,60	10,44	–	11,64	–	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33
6,0	10,98	11,61	12,24	12,90	13,08	–	14,45	–	16,25	–	18,35	–	20,75
6,30	11,70	–	13,04	–	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,32
6,70	12,42	13,13	13,84	14,69	14,65	–	16,20	–	18,21	–	20,56	–	23,24
7,10	13,14	–	14,64	–	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66
7,50	14,04	14,84	15,64	16,60	16,44	–	18,20	–	20,45	–	23,08	–	26,08
8,00	14,94	–	16,64	–	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85

Приміт ка: a_{sel} – номінальний розмір по меншій ст ороні; b_{sel} – номінальний розмір по більшій ст ороні

Таблиця 3.4 – Двобічна товщина ізоляції обмотувального проводу

В міліметрах

Марка проводу	Розміри проводу по меншій стороні a_{sel}				Розміри проводу по більшій стороні b_{sel}			
	0,90– 2,00	2,12– 3,75	4,00– 5,60	2,10– 2,50	2,65– 3,35	3,55– 4,50	4,75– 5,60	6,00– 7,10
	Двобічна товщина ізоляції по меншій стороні δ_{isa}				Двобічна товщина ізоляції по більшій стороні δ_{isb}			
ПСД, ПСДК	0,27	0,33	0,40	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44
ПЭТВСД	0,41	0,47	–	–	0,51	0,53	0,55	0,57

При номінальній напрузі, більшій за 1000 В, для проводу марки ПСД застосовують додаткову міжвиткову ізоляцію товщиною $\delta_{cis} = 0,2$ мм. Для цього елементарні провідники ізолюють один від одного по висоті міканітовими прокладками. Застосування проводу марки ПЭТВСД з посиленою емальволокнистою ізоляцією дозволяє не використовувати додаткову міжвиткову ізоляцію, але цей провід дорожчий.

Корпусна ізоляція запропонованої конструкції складається з двох конструктивних частин: ізоляції секції та ізоляції паза. Для ізоляції секції пропонується застосовувати ізоляцію на основі міканіту з подальшим вакуумним сушінням і просоченням термореактивним епоксидним компаундом гарячого отвердження. Двобічна товщина ізоляції однієї секції з урахуванням допусків на гаряче опресування по висоті та ширині паза однакова, $\delta_c = 3,27$ мм. Для ізоляції паза використовується прокладка з кабельного паперу товщиною $\Delta_c = 0,12$ мм, яка в один шар вистилає дно та стінки паза та в два шари загинається під скло-текстолітову прокладку. Таким чином, сумарна товщина корпусної ізоляції по висоті паза становить $\delta_{ch} = 6,42$ мм, по ширині паза – $\delta_{cb} = 3,27$ мм.

Ізоляція обмотки статора класу нагрівостійкості В.

Приклад заповнення паза наведено в табл. 3.5 та на рис. 3.2 для таких даних: $z_{Qs} = 10$, $N_{elh} = 2$, $N_{elb} = 2$.

3.31. Ширина паза статора, мм,

$$b_s = N_{elb} \cdot (b_{sel} + \delta_{isb}) + \delta_{cb} + \Delta_1 + \Delta_2.$$

Таблиця 3.5 – Розрахунок розмірів паза статора

Поз. на рис. 3.2	Назва матеріалу	Розміри, мм	
		по висоті паза	по ширині паза
1	Провід ПСД	$z_{Qs} \cdot N_{elh} \cdot a_{sel} =$ $= 10 \cdot 2 \cdot 2,12 = 42,4$	$N_{elb} \cdot b_{sel} =$ $= 2 \cdot 4,25 = 8,5$
2	Ізоляція обмотувального проводу	$z_{Qs} \cdot N_{elh} \cdot \delta_{isa} =$ $= 10 \cdot 2 \cdot 0,33 = 6,6$	$N_{elb} \cdot \delta_{isb} =$ $= 2 \cdot 0,39 = 0,78$
3	Гнучкий міканіт ГФС товщиною 0,2 мм	$(z_{Qs} \cdot N_{elh} - 2) \delta_{cis} =$ $= (10 \cdot 2 - 2) \cdot 0,2 = 3,6$	–
4	Стрічка слюдинітова просочена ЛСКН-160-ТТ товщиною 0,13 мм у 5 шарів у півнапустка	$2 \cdot 2,6 = 5,2$	2,6
5	Стрічка слюдинітова на компаунді ЛСК-110-СТ товщиною 0,2 мм в 1 шар в третину напустка	$2 \cdot 0,8 = 1,6$	0,8
6	Стрічка скляна ЛЕС товщиною 0,1 мм в 1 шар впритул	$2 \cdot 0,2 = 0,4$	0,2
Зменшення товщини ізоляції внаслідок гарячого опресування		$2 \cdot (-0,57) = -1,14$	- 0,57
7	Кабельний папір К-120, змащений пастою КПД, товщиною 0,12 мм	$3 \cdot 0,12 = 0,36$	$2 \cdot 0,12 = 0,24$
8	Склотекстоліт СТ-1 товщиною 0,5 мм	$3 \cdot 0,5 = 1,5$	–
9	Склотекстоліт СТЭО	3,5	–
Висота шліца		0,5	–
Допуск на штампування		$\Delta_1 = 0,3$	$\Delta_1 = 0,3$
Допуск на укладання секції		$2\Delta_2 = 2 \cdot 0,3 = 0,6$	$\Delta_2 = 0,3$
Розмір паза		65,42	13,15

3.32. Висота паза статора, мм,

$$h_s = z_{Qs} \cdot N_{elh} (a_{sel} + \delta_{isa}) + (z_{Qs} \cdot N_{elh} - 2) \delta_{cis} + \delta_{ch} + h_{s1} + h_{s2} + 3h_{s3} + \Delta_1 + 2\Delta_2,$$

де h_{s1} – висота шліца паза статора, приймається 0,5 мм;

h_{s2} – висота клина паза статора, приймається 3,5 мм;

h_{s3} – висота прокладок зі склотекстоліту, які розташовуються між шарами обмотки, під клином та на дні паза, висота кожної прокладки становить 0,5 мм.

3.33. Пазовий крок осердя статора в розрахунковому перерізі, мм,

$$\tau_{s1/3} = \frac{\pi \left(d_s + \frac{2}{3} h_s \right)}{Q_s}.$$

3.34. Ширина зубця статора в розрахунковому перерізі, мм,

$$b_{ts1/3} = \tau_{s1/3} - b_s.$$

3.35. Магнітна індукція в розрахунковому перерізі зубця статора, Тл,

$$B_{ts1/3} = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_e \cdot m_s \cdot q_s \cdot l_{ef} \cdot b_{ts1/3}} \cdot 10^6.$$

Якщо значення $B_{ts1/3}$ виходить за допустимі межі 1,4–1,7 Тл, то необхідно перейти на обмотувальний провід з іншими розмірами поперечного перерізу, щоби змінити розміри зубця осердя статора.

3.36. Розрахункова висота спинки статора, мм,

$$h_{ys} = \frac{d_{se} - d_s}{2} - h_s - h_{ysd},$$

де h_{ysd} – додатковий розмір, який враховує зменшення висоти спинки статора отворами під шпильки, що стягують осердя, вибирається 5–10 мм.

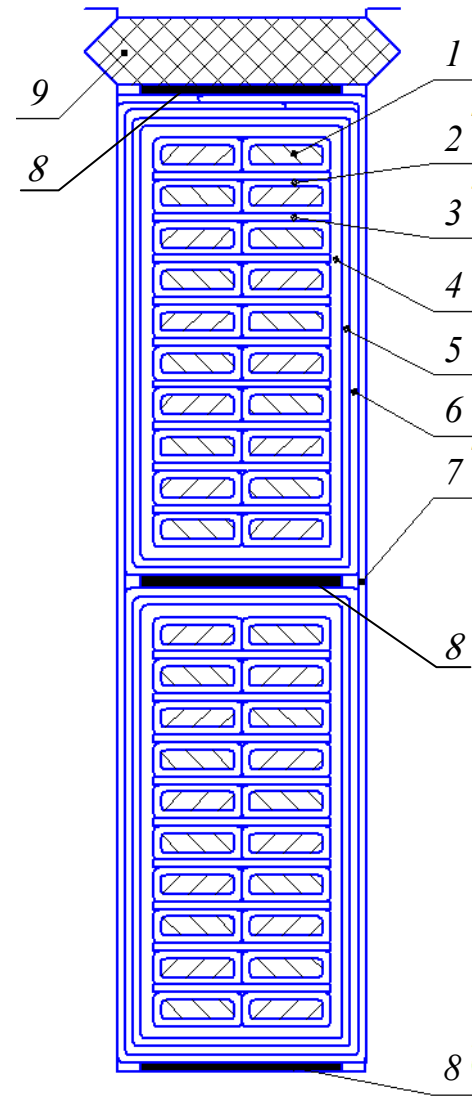


Рисунок 3.2 – Приклад заповнення паза статора

3.37. Магнітна індукція в спинці статора, Тл,

$$B_{ys} = \frac{\Phi_{\delta}}{2h_{ys} \cdot l_{ef}} \cdot 10^6.$$

Якщо значення B_{ys} виходить за допустимі межі 1,3–1,5 Тл, то необхідно змінити діаметр d_s та уточнити величини τ_p , B_{δ} , A_s , $\tau_s^{1/3}$, $b_{ts}^{1/3}$, $B_{ts}^{1/3}$, h_{ys} , B_{ys} .

3.38. Густина струму обмотки статора, А/мм²,

$$J_s = \frac{I_{sN}}{a_s \cdot N_{el} \cdot S_{sel}}.$$

Отримане значення має знаходитись у зазначених межах (п. 3.24).

3.39. Скласти заповнення паза статора за зразком, наведеним на рис. 3.2.

Остаточний розрахунок розмірів паза статора виконати за зразком табл. 3.5.

Отримані розміри паза статора $h_s \times b_s$ можна вважати остаточними.

3.40. Пазовий крок статора по внутрішньому діаметру, мм,

$$\tau_s = \frac{\pi d_s}{Q_s}.$$

3.41. Периметр поверхні охолодження паза статора, мм,

$$P_{sc} = 2(h_s - h_{s1} - h_{s2}) + b_s.$$

3.42. Питома поверхня охолодження паза статора, см²/Вт,

$$S_{\theta s} = \frac{4800 P_{sc}}{A_s \cdot J_s \cdot \tau_s}.$$

Значення питомої поверхні охолодження $S_{\theta s}$ має знаходитись в межах 8–15 см²/Вт.

3.43. Середня довжина лобової частини обмотки статора, мм,

$$l_{fhs} = \frac{\pi(d_s + h_s)\beta_Q}{2p \sqrt{1 - \left(\frac{b_s + \Delta}{\tau_p}\right)^2}} + h_s + 2l_1,$$

де Δ – відстань між лобовими частинами двох суміжних катушок у складеному статорі, для номінальної напруги 6,3 кВ становить 5 мм;

l_1 – відстань від осердя статора до центра радіусу заокруглення лобової частини r , для номінальної напруги 6,3 кВ становить 50 мм.

Розміри Δ , l_1 та r наведено на рис. 3.3. Остаточні розміри визначаються при кресленні обмотки статора.

3.44. Сумарна висота шліца, клина та трьох прокладок паза статора, мм,

$$h_{s123} = h_{s1} + h_{s2} + h_{s3}.$$

3.45. Довжина вильоту лобової частини обмотки статора, мм,

$$l_{fhs1} = \left[\left(r_{el} + \frac{l_1}{2} \right) \left(\frac{\pi(d_s + 2h_{s123})}{(b_s + \Delta)Q_s} - 1 \right) + \frac{\pi \left(d_s + \frac{h_s + 3h_{s123}}{2} \right) y_{Q_s}}{Q_s} \right] \times \\ \times \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{(b_s + \Delta)Q_s}{\pi(d_s + 2h_{s123})} \right),$$

де r_{el} – радіус заокруглення елементарного провідника, для номінальної напруги 6,3 кВ становить 50 мм (див. рис. 3.3).

3.46. Середня довжина витка секції обмотки статора, мм,

$$l_{Wav} = 2(l_s + l_{fhs}).$$

3.47. Активний опір обмотки статора в холодному стані (при 20 °С), Ом,

$$R_{s\theta} = \rho_{Cu20^\circ C} \cdot \frac{N_s \cdot l_{Wav}}{a_s \cdot N_{el} \cdot S_{sel}} \cdot 10^{-3},$$

де $\rho_{Cu20^\circ C}$ – питомий опір міді в холодному стані, становить 0,0175 Ом·мм.

3.48. Активний опір обмотки статора в нагрітому стані (при 75 °С), Ом,

$$R_s = k_{\theta Cu} \cdot R_{s\theta},$$

де $k_{\theta Cu}$ – температурний коефіцієнт, для зазначених температур 20 °С та 75 °С дорівнює 1,22.

3.49. Активний опір обмотки статора у відносних одиницях

$$R_{s*} = R_s \cdot \frac{I_{sN}}{U_{sN}}.$$

Зазвичай в синхронних машинах середньої та великої потужності опір R_{s*} становить 0,01–0,05.

3.50. Коефіцієнт провідності пазового розсіяння обмотки статора для відкритого паза з паралельними стінками

$$\lambda_{sn} = \frac{h_{s123} + h_{s4}}{b_s} (0,2 + 0,8\beta_Q) + \frac{h_{s5}}{4b_s} + \frac{h_{s6} - h_{s5}}{3b_s} (0,4 + 0,6\beta_Q),$$

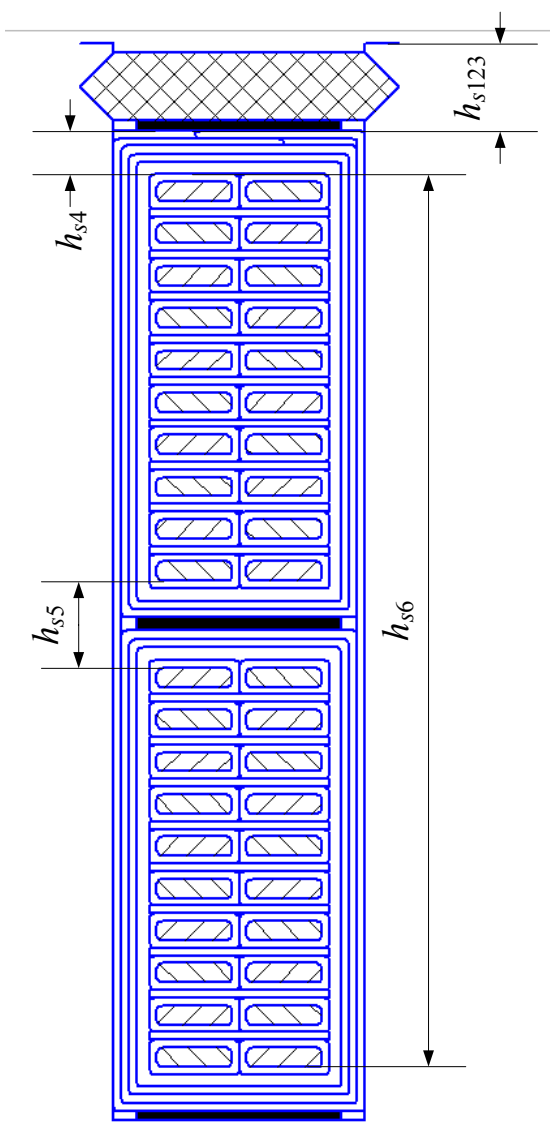


Рисунок 3.4 – Часткові розміри паза статора

де h_{s4} , h_{s5} , h_{s6} – часткові розміри по висоті паза, визначаються з рис. 3.4 або за формулами:

$$h_{s4} = \frac{\delta_{is a} + \delta_c}{2} + 2\Delta_c;$$

$$h_{s5} = \delta_{is a} + \delta_c + h_{s3};$$

$$h_{s6} = h_s - h_{s1} - h_{s2} - 2h_{s3} - \delta_{is a} - \delta_{ch}.$$

3.51. Коефіцієнт провідності по коронках зубців статора

$$\lambda_{sd} = \left[0,71 \cdot \lg \frac{\tau_s}{b_s} + 0,16(q_s - 1) \right] \times (0,25 + 0,75\beta_Q).$$

3.52. Коефіцієнт провідності лобового розсіяння обмотки статора

$$\lambda_{s fh} = 0,34 \frac{q_s}{l_s} (l_{fhs} - 0,64\beta_Q \cdot \tau_p).$$

3.53. Сумарний коефіцієнт провідності розсіяння обмотки статора

$$\lambda_{\sigma s} = \lambda_{sn} + \lambda_{sd} + \lambda_{s fh}.$$

3.54. Індуктивний опір розсіяння обмотки статора, Ом,

$$X_{\sigma s} = 4\pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot N_s^2 \cdot l_s \cdot \lambda_{\sigma s}}{p \cdot q_s} \cdot 10^{-3},$$

де μ_0 – магнітна стала, дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

3.55. Індуктивний опір розсіяння обмотки статора у відносних одиницях

$$X_{\sigma s*} = X_{\sigma s} \cdot \frac{I_{sN}}{U_{sN}}.$$

Зазвичай в синхронних машинах середньої та великої потужності опір $X_{\sigma s*}$ становить 0,05–0,16.

4. ПРОЄКТУВАННЯ РОТОРА

4.1. Повітряний проміжок під серединою полюса, мм,

$$\delta = (0,35-0,40) \cdot K'_k \cdot \frac{A_s \cdot \tau_p}{B_\delta \cdot 10^4},$$

де K'_k – попереднє значення відношення короткого замикання, для синхронних машин з $2p = (4-24)$ знаходиться в межах 0,8–1,2.

Отримане значення δ заокруглюється з кроком 0,5 мм.

Величина повітряного проміжку остаточно уточняється після визначення фактичного значення K_k .

4.2. Повітряний проміжок під краями полюса, мм, $\delta_{max} = 1,5\delta$.

Розбіжний повітряний проміжок в синхронних явнополюсних машинах виконується з метою наближення розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку до синусоїдного.

4.3. Довжина полюса, мм, $l_p = l_s$.

4.4. Еквівалентна периферійна ширина полюса по дузі (рис. 4.1), мм,

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

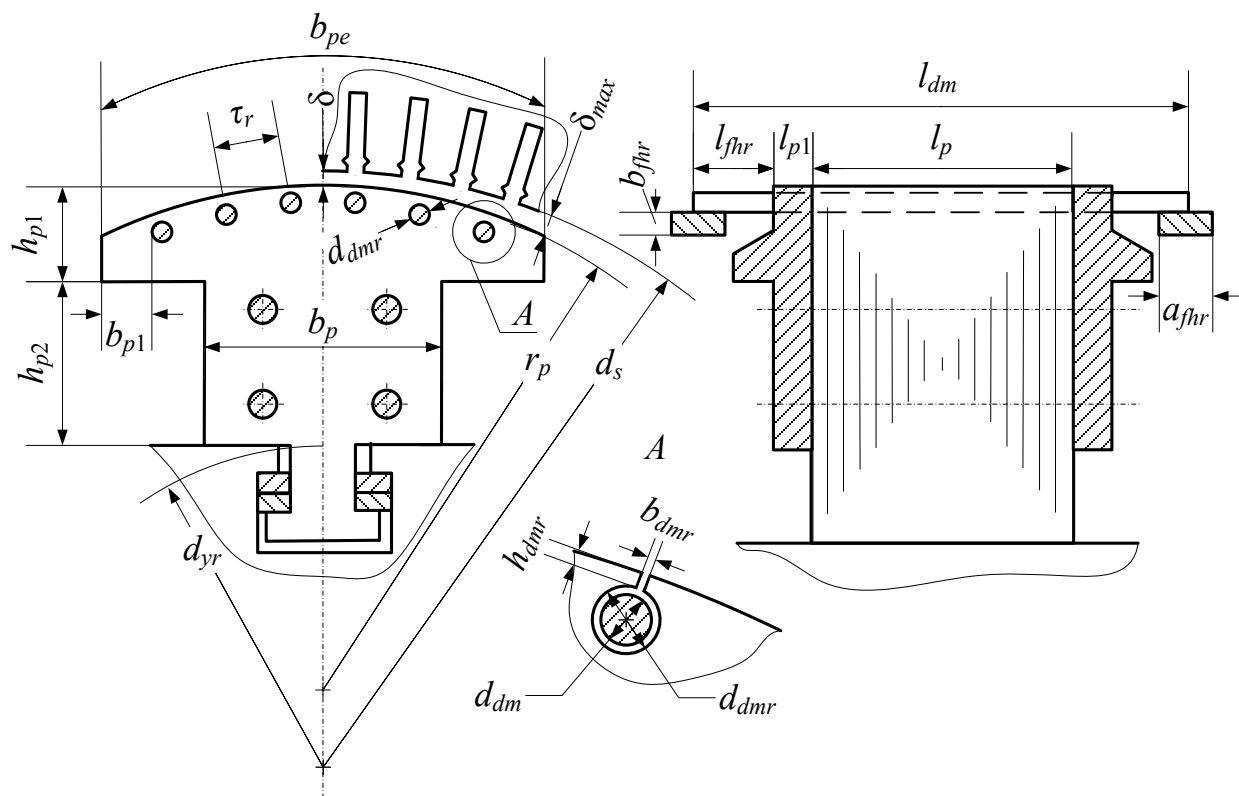


Рисунок 4.1 – Розміри елементів конструкції полюса ротора з демпферною обмоткою

4.5. Ширина осердя полюса, мм,

$$b_p = \frac{\Phi_\delta \cdot (\tau_p + 8\delta)}{(l_p \cdot k_{Fer} + l_{p1}) \cdot B'_p \cdot \tau_p} \cdot 10^6,$$

де k_{Fer} – коефіцієнт заповнення осердя полюса сталлю, дорівнює 0,95 для лакованих листів сталі завтовшки 1,0 мм та 0,97 для лакованих листів сталі завтовшки 1,5 мм;

l_{p1} – товщина фланця, обирається залежно від кількості полюсів $2p$ (табл. 4.1);

B'_p – попереднє значення магнітної індукції в осерді полюса, знаходиться в межах 1,3–1,6 Тл.

4.6. Попереднє значення висоти осердя полюса, мм,

$$h'_{p2} = k_c \cdot \tau_p + 2\delta_{ph} + 40,$$

де k_c – коефіцієнт висоти котушки, обирається залежно від кількості полюсів $2p$ (табл. 4.1);

δ_{ph} – сумарна товщина склотекстолітової рамки та міканітової прокладки, за допомогою яких котушка зверху і знизу ізолюється від осердя полюса та остова ротора, прийняти 8,5 мм.

Таблиця 4.1 – Значення товщини фланця l_{p1} та коефіцієнта висоти котушки обмотки збудження k_c

$2p$	6	8	10	12	16	20
l_{p1} , мм	60–50	55–45	50–35	45–30	35–25	30–15
k_c	0,15–0,19	0,19–0,24	0,25–0,28	0,28–0,33	0,32–0,39	0,38–0,41

4.7. Радіус заокруглення полюсного наконечника, мм,

$$r_p = \frac{d_s}{2 + \frac{8d_s(\delta_{max} - \delta)}{b_{pe}^2}}.$$

4.8. Вибір кількості стрижнів демпферної (пускової) обмотки

4.8.1. Кількість стрижнів демпферної обмотки на один полюс

Кількість стрижнів демпферної обмотки на один полюс в синхронних

машинах зазначеної потужності буває від 5 до 11.

Для визначення кількості стрижнів демпферної обмотки на один полюс N_{dm} необхідно розрахувати варіанти для значень $N'_{dm} = 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$ за пп. 4.8.2–4.8.5 та з них вибрати той, що задовольняє вимогам п. 4.8.5. Розрахунок обраного варіанту навести в пояснювальній записці.

4.8.2. Площа поперечного перерізу стрижня демпферної обмотки, мм²,

$$S_{dm} = k \cdot \frac{z_{Qs} \cdot Q_s \cdot N_{el} \cdot S_{sel}}{2p \cdot N_{dm}},$$

де k – частка площі поперечного перерізу стрижнів демпферної обмотки від загальної площі поперечного перерізу всіх провідників обмотки статора, яка для генераторів знаходиться в межах 0,15–0,25, для двигунів – 0,25–0,35.

4.8.3. Діаметр стрижня демпферної обмотки, мм,

$$d_{dm} = 2 \sqrt{\frac{S_{dm}}{\pi}}.$$

Отримане значення заокруглюють з кроком 0,5 мм.

4.8.4. Зубцевий крок ротора (відстань між центрами стрижнів демпферної обмотки), мм,

$$\tau_r = \frac{b_{pe} - d_{dm} - 2b_{p1}}{N_{dm} - 1},$$

де b_{p1} – відстань між краєм полюсного наконечника та крайнім стрижнем, приймається не менше 5 мм.

4.8.5. Перевірка на відповідність вимогам

4.8.5.1. Для генераторів:

➤ якщо q_s – ціле число, або $q_s = b + \frac{c}{d} = b + \frac{1}{2}$, або $b \cdot d + c \leq 9$,

$$\text{то } 0,8\tau_s < \tau_r < \tau_s \text{ та } \tau_r \leq \frac{\tau_p}{3q_s + 1};$$

➤ якщо $b \cdot d + c > 9$,

$$\text{то } \tau_r = \tau_s.$$

4.8.5.2. Для двигунів:

$$\tau_r \geq 0,8\tau_s; \quad \tau_r \neq \tau_s; \quad (N_{dm} - 1) \cdot \left(1 - \frac{\tau_r}{\tau_s}\right) > 0,75.$$

4.9. Площа поперечного перерізу короткозамикального кільця (сегменту), мм²,

$$S'_{fhr} = 0,5N_{dm} \cdot S_{dm}.$$

4.10. Попереднє мінімальне значення товщини короткозамикального кільця (сегменту), мм,

$$a'_{fhr} = \frac{2}{3}d_{dm}.$$

4.11. За знайденими значеннями S'_{fhr} та a'_{fhr} вибрати розміри $a_{fhr} \times b_{fhr}$ та визначити площу поперечного перерізу S_{fhr} шинної міді, з якої будуть виготовлені сегменти короткозамикальних кілець (табл. 4.2).

4.12. Діаметр паза демпферної обмотки, мм,

$$d_{dmr} = d_{dm} + 0,1.$$

4.13. Ширина шлиця паза демпферної обмотки $b_{dmr} = 3-4$ мм.

4.14. Висота шлиця паза демпферної обмотки $h_{dmr} = 2-3$ мм.

Таблиця 4.2 – Розміри та перерізи шинної міді ГОСТ 434

b, мм	a, мм								
	2,83	3,00	3,05	3,28	3,35	3,55	4,00	4,40	4,50
	Розрахунковий переріз, мм ²								
16,0	–	47,45	–	–	53,05	56,25	63,14	–	71,14
16,8	47,06	–	50,70	54,62	–	–	–	–	–
18,0	50,46	53,40	54,42	58,56	58,82	–	–	–	–
19,5	54,70	–	59,00	63,48	63,06	63,40	–	–	–
20,0	–	59,52	–	–	68,35	–	79,52	–	–
22,0	61,78	–	66,62	71,68	–	–	–	95,94	–
22,4	–	–	–	–	77,18	–	–	–	–
25,0	–	74,52	–	81,52	–	–	99,52	109,14	–
28,0	–	–	–	–	–	–	111,94	122,34	–
30,0	–	–	–	–	–	–	119,52	131,14	–
32,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
35,0	–	–	–	–	–	–	–	153,14	–
40,0	–	–	–	–	–	–	159,52	–	179,10
45,0	–	–	–	–	–	–	179,52	–	201,60

Закінчення табл. 4.2

b, мм	a, мм							
	5,00	5,10	5,50	5,60	6,00	6,50	7,00	8,00
	Розрахунковий переріз, мм ²							
16,8	–	84,82	91,54	–	99,94	–	–	–
18,0	–	90,94	–	99,70	–	–	–	143,14
19,5	–	98,59	106,39	–	–	125,89	–	155,14
20,0	99,14	–	–	–	119,14	–	–	159,14
22,0	–	111,30	–	–	131,14	–	153,14	–
22,4	–	–	–	–	–	–	–	–
25,0	124,14	126,64	136,64	–	149,14	161,14	–	198,10
28,0	–	141,94	–	–	167,14	181,10	–	–
30,0	149,14	152,14	164,14	167,10	179,10	193,10	208,10	238,10
32,0	–	–	–	–	191,10	206,10	–	–
35,0	174,10	–	191,60	–	209,10	225,60	–	278,10
40,0	199,10	–	219,10	–	239,10	285,10	278,10	318,10
45,0	224,10	–	246,60	–	269,10	290,60	313,10	358,10
50,0	219,10	–	274,10	–	299,10	323,10	348,10	398,10
55,0	271,10	–	301,60	–	329,10	355,60	383,10	438,10
60,0	299,10	–	329,10	–	359,10	388,10	418,10	478,10
65,0	324,10	–	–	–	389,10	–	–	–

4.16. Довжина стрижня демпферної обмотки, мм,

$$l_{dm} = l_p + 2(l_{p1} + l_{fhr}),$$

де l_{fhr} – виліт стрижнів в лобових частинах, при швидкості $v_r < 30$ м/с дорівнює 10–20 мм; при швидкості $v_r \geq 30$ м/с дорівнює 70–120 мм.

4.17. Висота полюсного наконечника, мм,

$$h_{p1} = k_b(b_{pe} - b_p) + d_{dm},$$

де k_b – конструктивний коефіцієнт, приймається 0,3–0,4.

4.18. Попереднє значення зовнішнього діаметра корпусу ротора (діаметр спинки ротора), мм,

$$d'_{yr} = d_s - 2(\delta + h_{p1} + h'_{p2}).$$

Отримане значення має бути більшим за діаметр вала під корпусом ротора, який обирається за табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення діаметра вала під корпусом ротора

d_{se} , мм		1180	1430	1730	2150
2p	6	180–170	250–240	310–290	370–340
	8	170–160	230–310	310–290	370–340
	10	170–160	220–210	300–280	370–340
	12	170–160	220–210	300–280	360–340
	16	160–150	260–200	270–250	350–310
	20	160–140	200–190	260–250	350–300

Примітка: Значення над жирною лінією відповідають конструкції корпуса ротора у вигляді колеса, під жирною лінією – у вигляді втулки.

4.19. Довжина корпуса ротора, мм,

$$l_{yr} = l_p + K,$$

де K – конструктивний розмір, знаходиться в межах 100–150 мм.

4.20. Найменша допустима висота активної частини корпуса ротора (висота спинки ротора), мм,

$$h_{yr} = \frac{\Phi_{\delta}}{2l_{yr} \cdot B'_{yr}} \left(1 + \frac{8\delta}{\tau_p} \right) \cdot 10^6,$$

де B'_{yr} – попереднє значення магнітної індукції спинки ротора, знаходиться в межах 0,9–1,1 Тл.

Значення h_{yr} остаточно визначається при розробці конструкції ротора.

4.21. За визначеними розмірами накреслити полюс ротора з демпферною обмоткою (див. рис. 4.1).

5. МАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

5.1. Розрахунок магнітного кола

5.1.1. Розрахунковий повітряний проміжок для явнополюсних синхронних машин з розбіжним повітряним проміжком, мм,

$$\delta_c = \delta + \frac{1}{3}(\delta_{max} - \delta).$$

5.1.2. Коефіцієнт Картера, що враховує зубчастість статора:

$$\begin{aligned} \text{➤ при } \frac{b_s}{\delta_c} \leq 2 \quad K_{Cs} &= \frac{\tau_s + 10\delta_c}{b_s + 10\delta_c}; \\ \text{➤ при } \frac{b_s}{\delta_c} > 2 \quad K_{Cs} &= \frac{\tau_s}{\tau_s - \frac{b_s^2}{5\delta_c + b_s}}. \end{aligned}$$

5.1.3. Коефіцієнт Картера, який враховує зубчастість полюсного наконечника:

$$\begin{aligned} \text{➤ при } \frac{b_{dmr}}{\delta_c} \leq 2 \quad K_{Cr} &= \frac{\tau_r + 10\delta_c}{b_{dmr} + 10\delta_c}; \\ \text{➤ при } \frac{b_{dmr}}{\delta_c} > 2 \quad K_{Cr} &= \frac{\tau_r}{\tau_r - \frac{b_{dmr}^2}{5\delta_c + b_{dmr}}}. \end{aligned}$$

5.1.4. Коефіцієнт Картера

$$K_C = K_{Cs} \cdot K_{Cr}.$$

5.1.5. Середня довжина силової лінії в спинці статора, мм,

$$l_{ys} = \frac{\pi(d_{se} - h_{ys})}{4p}.$$

5.1.6. Середня довжина силової лінії в ярмі ротора, мм,

$$l_{yr} = \frac{\pi(d'_{yr} - h_{yr})}{4p}.$$

5.1.7. Довжина дуги між осердями поряд розташованих полюсів по усередненій дузі у поперечному перерізі, мм,

$$c_{p1} = \frac{\pi(d_s - 2\delta - 2h_{p1} - h'_{p2})}{2p} - (b_p + \delta_{ph}).$$

5.1.8. Довжина дуги між наконечниками поряд розташованих полюсів по усередненій лінії у поперечному перерізі, мм,

$$c_{p2} = \tau_p - b_{pe}.$$

5.1.9. Магнітна провідність між осердями поряд розташованих полюсів, Гн,

$$\Lambda_{p1} = \frac{1,8}{c_{p1}} (h_{p2} - \delta_{ph}) \cdot (l_p + 2l_{p1} + b_p) \cdot 10^{-9}.$$

5.1.10. Магнітна провідність між наконечниками поряд розташованих по-

люсів, Гн,

$$\Lambda_{p2} = \frac{5}{c_{p2}} \left(h_{p1} - \frac{0,3\tau_p}{2p} \right) \cdot (l_p + 2l_{p1} + b_{pe}) \cdot 10^{-9}.$$

5.1.11. Магнітна провідність полюсів, Гн,

$$\Lambda_p = \Lambda_{p1} + \Lambda_{p2}.$$

5.1.12. Зубцевий коефіцієнт

$$K_{ts\frac{1}{3}} = \frac{\tau_s\frac{1}{3}}{b_{ts\frac{1}{3}} \cdot k_{Fe s}} - 1.$$

5.2. Розрахунок характеристики неробочого ходу

5.2.1. Магнітний потік повітряного проміжку при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Вб,

$$\Phi_{\delta o} = \frac{E_{so}}{4,44 f \cdot N_s \cdot K_{Ws}},$$

де E_{so} – ЕРС фазної обмотки статора при неробочому ході, дорівнює U_{sN} .

5.2.2. Магнітна індукція в повітряному проміжку при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Тл,

$$B_{\delta o} = \frac{\Phi_{\delta o}}{\alpha_e \cdot \tau_p \cdot l_s} \cdot 10^6$$

5.2.3. Магнітна напруга повітряного проміжку при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{\delta o} = \frac{1}{\mu_0} \cdot K_C \cdot \delta \cdot B_{\delta o} \cdot 10^{-3}.$$

5.2.4. Магнітна індукція зубця статора в розрахунковому перерізі при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Тл,

$$B_{ts\frac{1}{3}o} = \frac{\Phi_{\delta o}}{\alpha_e \cdot m_s \cdot q_s \cdot l_{ef} \cdot b_{ts\frac{1}{3}}} \cdot 10^6.$$

5.2.5. Напруженість магнітного поля в розрахунковому перерізі зубця статора $H_{ts\frac{1}{3}}$, А/см, при значеннях магнітної індукції $B_{ts\frac{1}{3}o} \leq 1,8$ Тл визначається залежно від обраної марки сталі для осердя статора. Рекомендується використовувати сталь марки 2211 товщиною 0,5 мм (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. – Основна крива намагнічування сталі 2211

B , Тл	H , А/см									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85
0,9	1,9	1,95	2,0	2,05	2,1	2,15	2,2	2,25	2,3	2,35
1,0	2,4	2,46	2,52	2,58	2,64	2,7	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
1,2	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7	4,8	5,0	5,2
1,3	5,5	5,8	6,1	6,5	6,9	7,3	7,8	8,3	8,8	9,4
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34	36	38	41	44	47	53	59	65	71
1,7	77	82	89	94	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188
1,9	194	200	218	237	257	278	300	322	344	366
2,0	388	410	432	454	476	498	520	545	575	605
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1230	1260

При значеннях магнітної індукції $B_{ts\frac{1}{3}o} > 1,8$ Тл напруженість магнітного поля в розрахунковому перерізі зубця статора $H_{ts\frac{1}{3}}$, А/см, визначається методом послідовних наближень за рівнянням

$$B_{ts\frac{1}{3}o} = B_{ts\frac{1}{3}} + \mu_0 \cdot H_{ts\frac{1}{3}} \cdot K_{ts\frac{1}{3}} \cdot 10^2,$$

де $B_{ts\frac{1}{3}}$ та $H_{ts\frac{1}{3}}$ – значення магнітної індукції та напруженості, які відповідають одне одному за основною кривою намагнічування матеріалу осердя статора.

5.2.6. Магнітна напруга в розрахунковому перерізі зубця статора при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{ts\frac{1}{3}o} = 0,1 H_{ts\frac{1}{3}} \cdot h_s.$$

5.2.7. Магнітна індукція спинки статора при неробочому ході та ЕРС, яка

дорівнює номінальній фазній напрузі, Тл,

$$B_{yso} = \frac{\Phi_{\delta o}}{2h_{ys} \cdot l_{ef}} \cdot 10^6.$$

5.2.8. Напруженість магнітного поля в спинці статора H_{ys} , А/см, визначається за табл. 5.1 для отриманого значення магнітної індукції B_{yso} .

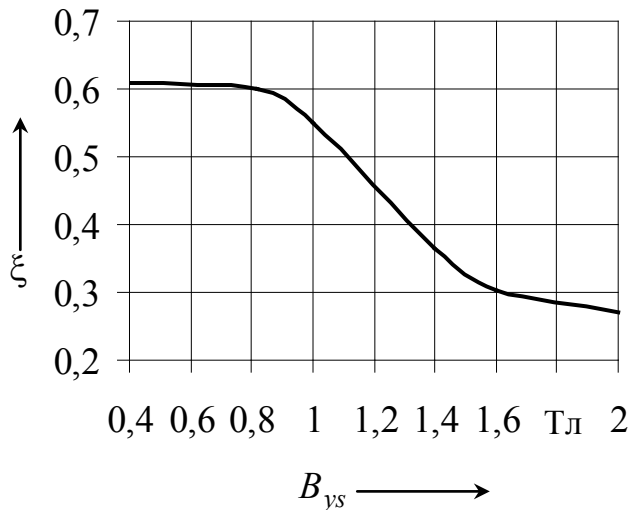


Рисунок 5.1 – Залежність $\xi(B_{ys})$

5.2.9. Магнітна напруга в спинці статора при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{yso} = 0,1H_{ys} \cdot l_{ys} \cdot \xi,$$

де ξ – коефіцієнт, що враховує нерівномірний розподіл магнітної індукції в поперечному перерізі спинки статора, обирається за рис. 5.1.

5.2.10. Магнітний потік розсіяння при неробочому ході та

ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Вб,

$$\Phi_{\sigma o} = \Lambda_p \left(F_{\delta o} + F_{ts \frac{1}{3} o} + F_{yso} \right).$$

5.2.11. Магнітний потік в осерді полюса при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Вб,

$$\Phi_{po} = \Phi_{\delta o} + \Phi_{\sigma o}.$$

5.2.12. Магнітна індукція осердя полюса при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Тл,

$$B_{po} = \frac{\Phi_{po}}{b_p \cdot l_p \cdot k_{Fer}} \cdot 10^6.$$

5.2.13. Напруженість магнітного поля в осерді полюса H_p , А/см, визначається за табл. 5.2 для отриманого значення магнітної індукції B_{po} .

5.2.14. Магнітна напруга в осерді полюса при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{po} = 0,1H_p (h_{p1} + h'_{p2}).$$

Таблиця 5.2 – Таблиця намагнічування листової сталі марки Ст3

B , Тл	H , А/см									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,6	2,95					3,2				
0,7	3,45					3,75				
0,8	4,05					4,40				
0,9	4,80	4,9	4,95	5,05	5,10	5,20	5,30	5,40	5,50	5,60
1,0	5,70	5,82	5,95	6,07	6,15	6,30	6,42	6,55	6,65	6,80
1,1	6,90	7,03	7,20	7,31	7,48	7,60	7,75	7,90	8,08	8,25
1,2	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,92	10,15	10,45
1,3	10,8	11,12	11,45	11,75	12,2	12,6	13,0	13,5	13,93	14,5
1,4	14,9	15,3	15,95	16,45	17,0	17,5	18,35	19,2	20,1	21,1
1,5	22,7	24,5	25,6	27,1	38,8	30,5	32,0	34,0	36,5	37,5
1,6	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,8	59,5	62,3	66,0
1,7	70,5	75,3	79,5	84,0	88,5	93,2	98,0	103	108	114
1,8	110	124	130	136	141	148	156	162	170	178
1,9	188	197	207	215	226	235	245	256	265	275
2,0	290	302	315	328	342	361	380	399	418	437

5.2.15. Магнітна індукція спинки ротора при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, Тл:

$$B_{yro} = \frac{\Phi_{po}}{2k_{Fer} \cdot l_p \cdot h_{yr}} \cdot 10^6.$$

5.2.16. Напруженість магнітного поля в спинці ротора H_{yr} , А/см, визначається за табл. 5.2 для отриманого значення магнітної індукції B_{yro} .

5.2.17. Магнітна напруга в спинці ротора при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{yro} = 0,1H_{yr} \cdot l_{yr}.$$

5.2.18. Магнітна напруга стику між полюсом та корпусом ротора при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{\delta yro} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \delta_p \cdot B_{po} \cdot 10^{-3},$$

де δ_p – довжина проміжку між полюсом та корпусом ротора, для синхронних машин середньої та великої потужності дорівнює 0,2 мм.

5.2.19. МРС обмотки збудження на один полюс при неробочому ході та ЕРС, яка дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$F_{Eo} = F_{\delta o} + F_{ts \frac{1}{3} o} + F_{yso} + F_{po} + F_{yro} + F_{\delta yro}.$$

5.2.20. Повторити розрахунок для значень магнітного потоку $0,58 \Phi_{\delta o}$, $1,21 \Phi_{\delta o}$, $1,33 \Phi_{\delta o}$. Результати розрахунків занести до табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунок характеристики неробочого ходу

Величина	Значення				
Магнітний потік $\Phi_{\delta*}$ або ЕРС обмотки статора E_*	0	0,58	1,0	1,21	1,33
Магнітний потік Φ_{δ} , Вб	0				
Магнітна індукція в повітряному проміжку B_{δ} , Тл	0				
МРС повітряного проміжку F_{δ} , А	0				
Магнітна індукція зубця статора в розрахунковому перерізі $B_{ts \frac{1}{3}}$, Тл	0				
Напруженість магнітного поля в розрахунковому перерізі зубця статора $H_{ts \frac{1}{3}}$, А/см	0				
Магнітна напруга в зубці статора в розрахунковому перерізі $F_{ts \frac{1}{3}}$, А	0				
Магнітна індукція спинки статора B_{ys} , Тл	0				
Напруженість магнітного поля в спинці статора H_{ys} , А/см	0				
Магнітна напруга в спинці статора F_{ys} , А	0				
$F_{\delta} + F_{ts \frac{1}{3}} + F_{ys}$, А					
Магнітний потік розсіяння Φ_{σ} , Вб	0				
Магнітний потік в осерді полюса Φ_p , Вб	0				
Магнітна індукція осердя полюса B_p , Тл	0				

Закінчення табл. 5.3

Величина	Значення			
Напруженість магнітного поля в осерді полюса $H_p, \text{A/cm}$	0			
Магнітна напруга в осерді полюса F_p, A	0			
Магнітна індукція спинки ротора $B_{yr}, \text{Tл}$	0			
Напруженість магнітного поля в спинці ротора $H_{yr}, \text{A/cm}$	0			
Магнітна напруга спинки ротора F_{yr}, A	0			
Магнітна напруга стику між полюсом та корпусом ротора $F_{\delta yr}, \text{A}$	0			
МРС обмотки збудження F_E, A	0			
МРС обмотки збудження F_{E^*}	0			

5.2.21. Магнітною характеристикою електричної машини є залежність $\Phi_{\delta}(F_E)$. Для синхронних машин магнітна характеристика будується у відносних одиницях, тобто $\Phi_{\delta^*}(F_{E^*})$. Для отримання величин у відносних одиницях поточні значення Φ_{δ} та F_E треба поділити на значення, які відповідають $1,0 \Phi_{\delta 0}$.

Магнітна характеристика, яка виражена у відносних одиницях, є також характеристикою неробочого ходу $E_*(I_{E^*})$, тому що $\Phi_{\delta^*} = E_*$ та $F_{E^*} = I_{E^*}$, де I_{E^*} – струм збудження у відносних одиницях. Розрахункова характеристика неробочого ходу повинна досить добре збігатися з нормальною характеристикою неробочого ходу, яка визначається за табл. 5.4. В разі розбіжності отриманої характеристики з нормальною характеристикою неробочого ходу необхідно змінити розміри магнітного кола синхронної машини, що проектується.

Таблиця 5.4 – Нормальна характеристика неробочого ходу

I_{E^*}	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
E_*	0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51

5.3. Розрахунок відношення короткого замикання

5.3.1. Амплітуда МРС реакції якоря при номінальному струмі, А,

$$F_{am} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_s \cdot \frac{I_{sN} \cdot N_s}{p} \cdot K_{W_s}$$

5.3.2. МРС обмотки збудження в режимі трифазного короткого замикання

при номінальному струмі обмотки статора, А,

$$F_k = k_{ad} F_{am} + X_{\sigma s^*} (F_{\delta o} + F_{\delta yro}),$$

де k_{ad} – коефіцієнт реакції якоря по поздовжній осі, визначається з рис. 5.2.

5.3.3. Відношення короткого замикання

$$K_k = \frac{F_{Eo}}{F_k}$$

Якщо значення відношення короткого замикання відрізняється від попередньо обраного більш, ніж на 10 %, то необхідно змінити величину повітряного

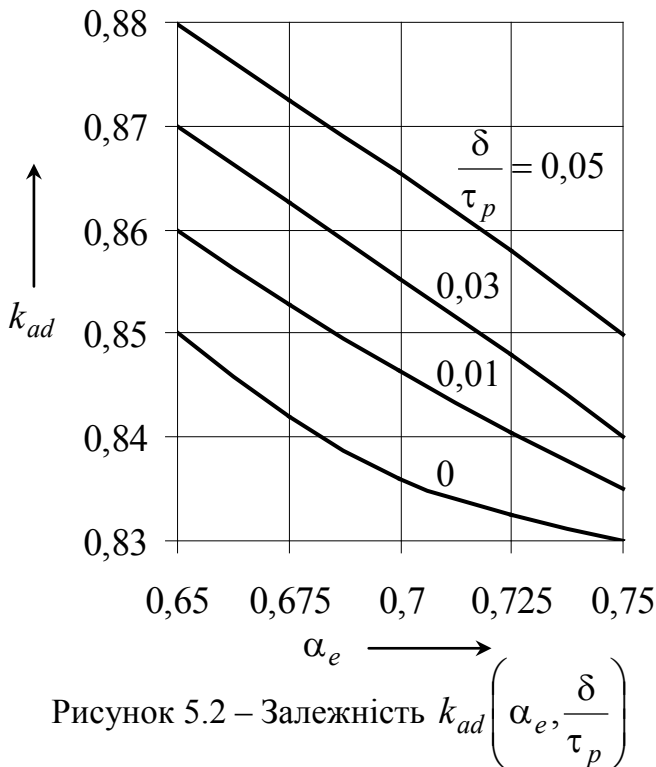


Рисунок 5.2 – Залежність k_{ad} від α_e та $\frac{\delta}{\tau_p}$

проміжку, внести відповідні зміни до розрахунку характеристики неробочого ходу, і знову перевірити величину відношення короткого замикання.

5.4. Розрахунок МРС обмотки збудження при номінальному навантаженні

5.4.1. Внутрішня ЕРС обмотки статора при номінальному навантаженні, в.о.:

➤ для генератора $E_{nom^*} = \sqrt{(\cos \varphi_N + R_{s^*})^2 + (\sin \varphi_N + X_{\sigma s^*})^2}$;

➤ для двигуна $E_{nom^*} = \sqrt{(\cos \varphi_N - R_{s^*})^2 + (-\sin \varphi_N + X_{\sigma s^*})^2}$.

5.4.2. Магнітний потік повітряного проміжку при номінальному навантаженні, Вб,

$$\Phi_{\delta nom} = E_{nom^*} \cdot \Phi_{\delta o}$$

5.4.3. МРС повітряного проміжку при номінальному навантаженні

$F_{\delta nom}$, А, розраховується за формулами пп. 5.2.2–5.2.3 для значення магнітного потоку $\Phi_{\delta nom}$.

5.4.4. Магнітна напруга в зубці статора в розрахунковому перерізі при номінальному навантаженні $F_{ts 1/3 nom}$, А, розраховується за формулами пп. 5.2.4–5.2.6 для значення магнітного потоку $\Phi_{\delta nom}$.

5.4.5. Магнітна напруга в спинці статора при номінальному навантаженні $F_{ys nom}$, А, розраховується за формулами пп. 5.2.7–5.2.9 для значення магнітного потоку $\Phi_{\delta nom}$.

5.4.6. Магнітний потік розсіяння при номінальному навантаженні, Вб,

$$\Phi_{\sigma nom} = \Lambda_p \left(F_{\delta nom} + F_{ts 1/3 nom} + F_{ys nom} + k_s \cdot k_{ad} \cdot F_a \right),$$

де k_s – коефіцієнт впливу характеру навантаження на величину реакції якоря, при $\cos \varphi_N = 0,8$ дорівнює 0,9, при $\cos \varphi_N = 0,9$ дорівнює 0,8.

5.4.7. Магнітний потік в осерді полюса при номінальному навантаженні, Вб,

$$\Phi_{p nom} = \Phi_{\delta nom} + \Phi_{\sigma nom}.$$

5.4.8. Магнітна напруга в осерді ротора при номінальному навантаженні $F_{p nom}$, А, розраховується за формулами пп. 5.2.12–5.2.14 для значення магнітного потоку $\Phi_{p nom}$.

5.4.9. Магнітна напруга в спинці ротора при номінальному навантаженні $F_{yr nom}$, А, розраховується за формулами пп. 5.2.15–5.2.17 для значення магнітного потоку $\Phi_{p nom}$.

5.4.10. МРС стику між полюсом та корпусом ротора при номінальному навантаженні $F_{\delta yr nom}$, А, розраховується за формулою п. 5.2.18 для значення магнітного потоку $\Phi_{p nom}$.

5.4.11. МРС обмотки збудження, яка необхідна для створення магнітного потоку $\Phi_{p nom}$, А,

$$F_{E nom} = F_{\delta nom} + F_{ts 1/3 nom} + F_{ys nom} + F_{p nom} + F_{yr nom} + F_{\delta yr nom}.$$

5.4.12. МРС обмотки збудження при номінальному навантаженні, А:

➤ для генератора

$$F_{EN} = \frac{F_{E\ nom}}{E_{nom*}} \sqrt{(\cos \varphi_N + R_{s*})^2 + \left(\sin \varphi_N + X_{\sigma s*} + E_{nom*} \cdot \frac{F_{am}}{F_{E\ nom}} \right)^2};$$

➤ для двигуна

$$F_{EN} = \frac{F_{E\ nom}}{E_{nom*}} \sqrt{(\cos \varphi_N - R_{s*})^2 + \left(-\sin \varphi_N + X_{\sigma s*} + E_{nom*} \cdot \frac{F_{am}}{F_{E\ nom}} \right)^2}.$$

6. ПРОЄКТУВАННЯ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

6.1. Конструкція обмотки збудження

Обмотку збудження в синхронних машинах потужністю більшою за 250 кВт виконують зі стрічкової міді, намотаної на ребро, з мінімальними розмірами $1,25 \times 14,5$ мм та мінімальною площею поперечного перерізу 30 мм^2 . Для поліпшення тепловіддачі та заповнення міжполюсного вікна котушки полюсів виконують одношаровими, з невеликою кількістю витків.

Виткова ізоляція котушок виконується з двох шарів електроізоляційного азбестового паперу завтовшки 0,2 мм, просоченого гліфталебакелітовим лаком. Котушка обмотки збудження ізолюється від осердя полюса формувальним міканітом (мікафолієм або скломікафолієм) загальною товщиною 1,5 мм. Згори та знизу котушки ізолюються міканітовими прокладками товщиною 0,5 мм і склотекстолітовими рамками товщиною 8–10 мм.

Ізоляція обмотки збудження класу нагрівостійкості В.

Ізоляційна конструкція обмотки збудження наведена в табл. 6.1 і на рис. 6.1.

Таблиця 6.1 – Ізоляція котушок обмотки збудження

Поз. на рис. 6.1	Назва матеріалу	Загальна товщина, мм
1	Папір азбестовий товщиною 0,2 мм в 2 шари	0,4
2	Міканіт формувальний товщиною 0,5 мм в 3 шари	1,5
3	Міканіт прокладковий товщиною 0,5 мм в 1 шар	0,5
4	Склотекстоліт товщиною 8 мм	8

Напряга обмотки збудження визначається номінальною напругою тиристорного збуджувального пристрою. Тиристорні збуджувальні пристрої випускаються серійно на постійну номінальну напругу 48, 75, 115, 150, 230 В та з максимальним струмом до 200, 320, 400, 500, 630, 800 та 1000 А.

6.2. Визначення розмірів котушки обмотки збудження

6.2.1. Попереднє значення середньої довжини витка котушки обмотки збудження (див. рис. 6.1), мм,

$$l'_{WE} = 2(l_p + b_p - 2l_{p1}) + \pi(2l_{p1} + 2\delta_{pb} + b'_E),$$

де b'_E – попереднє значення ширини витка обмотки збудження, прийняти 30 мм;

δ_{pb} – товщина ізоляції між осердям полюса та обмоткою збудження (поз. 3, рис. 6.1).

6.2.2. Попереднє значення площі поперечного перерізу провідника котушки обмотки збудження, мм²,

$$S'_E = k_{\theta Cu} \cdot \rho_{Cu20^\circ C} \cdot \frac{2p \cdot K'_E \cdot F_{EN} \cdot l'_{WE}}{U_E - \Delta U_E} \cdot 10^{-3},$$

де K'_E – попереднє значення коефіцієнту запасу збудження, для синхронних машин середньої та великої потужності знаходиться в межах 1,16–1,2;

U_E – напруга тиристорного збуджувального пристрою обирається з ряду номінальних напруг тиристорних збуджувальних пристроїв – 48, 75, 115, 150, 230 В;

ΔU_E – спад напруги в контакті між щіткою та контактним кільцем, знаходиться в межах 1–3 В.

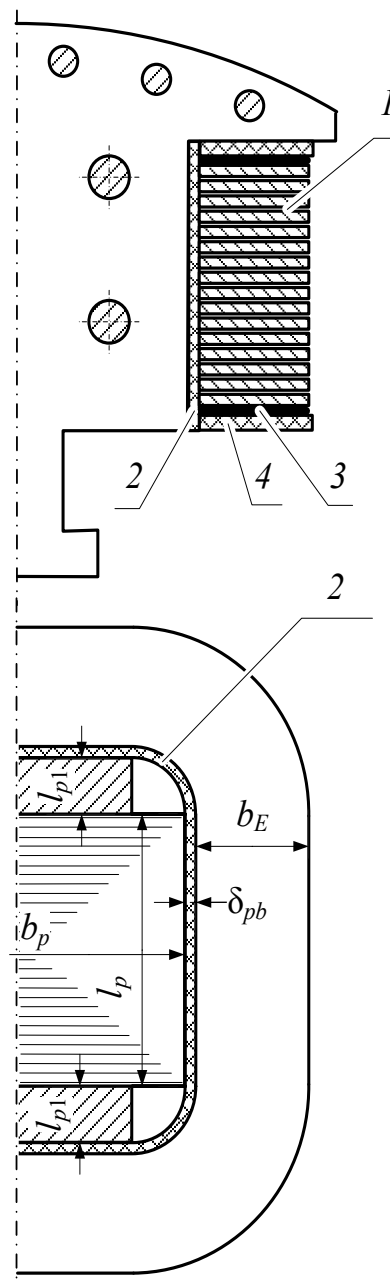


Рисунок 6.1 – Полюс з обмоткою збудження

6.2.3. Попереднє значення номінального струму збудження, А,

$$I'_{EN} = J_E S'_E,$$

де J_E – густина струму обмотки збудження, для одношарової обмотки збудження знаходиться в межах 3–4,5 А/мм².

6.2.4. Кількість витків котушки обмотки збудження (заокруглити до цілого)

$$N_E = \frac{F_{EN}}{I'_{EN}}.$$

6.2.5. Попереднє значення висоти провідника обмотки збудження, мм,

$$a'_E = \frac{h'_{p2} - 2\delta_{ph} - (N_E - 1)\delta_{is E}}{N_E},$$

де δ_{ph} – товщина міканітової прокладки та склотекстолітової рамки, для запропонованої конструкції ізоляції котушки обмотки збудження становить 8,5 мм;

$\delta_{is E}$ – товщина виткової ізоляції котушки обмотки збудження, для запропонованої конструкції дорівнює 0,4 мм.

6.2.6. Розміри провідника котушки обмотки збудження

За знайденими попередніми значеннями S'_E та a'_E вибрати стандартні значення висоти та ширини провідника котушки обмотки збудження $a_E \times b_E$ та площі поперечного перерізу S_E (табл. 4.2). При виборі розмірів провідника треба дотримуватись умови: $\frac{b_E}{a_E} \leq 20$.

6.2.7. Питома поверхня охолодження обмотки збудження при номінальному навантаженні, см²/Вт,

$$S_{\theta E} = \frac{500}{J_E^2 \cdot b_E}.$$

Величина $S_{\theta E}$ для класу ізоляції В має знаходитися в межах 0,9 – 2 см²/Вт.

Якщо величина $S_{\theta E}$ менше допустимої нижньої межі, слід зменшити густину струму J_E або збільшити кількість N_E витків через зміну розмірів провідника $a_E \times b_E$ та площі поперечного перерізу S_E . Якщо $S_{\theta E}$ більше допустимої верхньої межі, зробити навпаки.

6.2.8. Висота осердя полюса, мм,

$$h_{p2} = N_E \cdot a_E + (N_E - 1)\delta_{is E} + 2\delta_{ph} + \Delta_3,$$

де Δ_3 – допуск на укладання, знаходиться в межах 0,8–1,5 мм.

6.2.9. Розміри міжполюсного вікна

Накреслити в масштабі поперечний переріз активних частин синхронної машини в межах одного полюсного кроку з обмоткою збудження спроектованої синхронної машини (рис. 6.3). Визначити мінімальну відстань між котушками обмотки збудження поруч розташованих полюсів. Ця відстань повинна бути не меншою 7 мм. Якщо відстань менша, то необхідно змінити ширину полюса або ширину провідника котушки обмотки збудження.

Якщо розміри осердя полюса після уточнення змінилися більш ніж на 5 %, то в розрахунок характеристики неробочого ходу і МРС збудження при номінальному навантаженні необхідно ввести відповідні корективи та перевірити питому поверхню охолодження обмотки збудження при номінальному навантаженні.

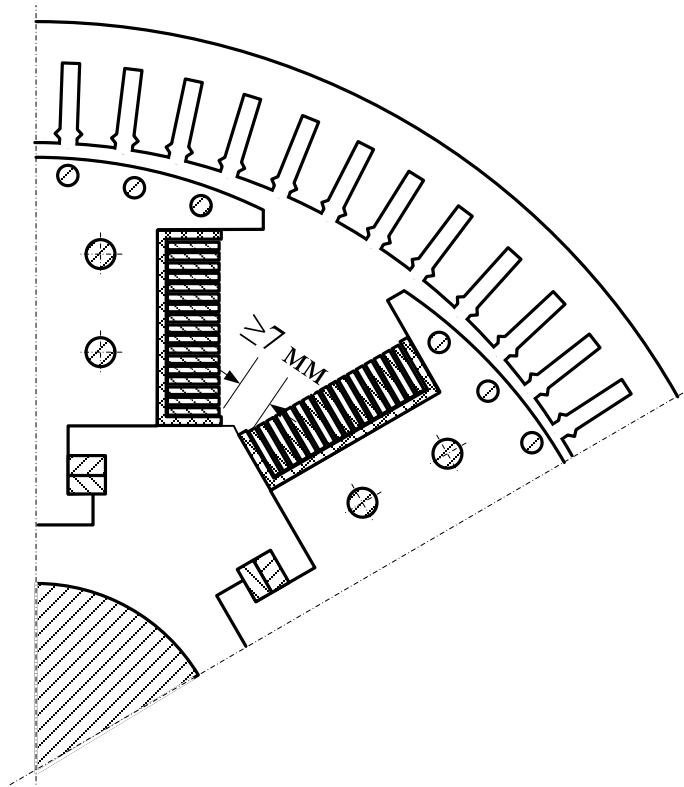


Рисунок 6.3 – Поперечний переріз активної частини шестиполюсної синхронної машини з шихтованим корпусом ротора на одному полюсному кроці

Якщо всі умови виконуються, розміри активних частин синхронної машини вважати остаточними.

6.2.10. Середня довжина витка котушки обмотки збудження, мм,

$$l_{WE} = 2(l_p + b_p - 2l_{p1}) + \pi(2l_{p1} + 2\delta_{pb} + b_E).$$

6.2.11. Активний опір обмотки збудження в холодному стані (при 20 °С), Ом,

$$R_{E\theta} = \rho_{Cu20^\circ C} \cdot \frac{2p \cdot N_E \cdot l_{WE} \cdot 10^{-3}}{S_E}.$$

6.2.12. Активний опір обмотки збудження в нагрітому стані (при 75 °С), Ом,

$$R_E = k_{\theta Cu} \cdot R_{E\theta}.$$

6.2.13. Активний опір обмотки збудження у відносних одиницях

$$R_{E*} = R_E \cdot \frac{I_{sN}}{U_{sN}}.$$

6.2.14. Максимальний струм збудження, А,

$$I_{E \max} = \frac{U_E - \Delta U_E}{R_E}.$$

6.2.15. Номінальний струм збудження, А,

$$I_{EN} = \frac{F_{EN}}{N_E}.$$

6.2.16. Коефіцієнт запасу збудження

$$K_E = \frac{I_{E \max}}{I_{EN}}.$$

Величина K_E не повинна відрізнятись від попередньо обраної більше, ніж на 5 %. У разі більшої розбіжності отриманої та попередньо обраної величин K_E обрати інший тиристорний збуджувальний пристрій або змінити розміри обмотки збудження.

6.2.17. Струм збудження при неробочому ході та ЕРС, що дорівнює номінальній фазній напрузі, А,

$$I_{Eo} = \frac{F_{Eo}}{N_E}.$$

7. РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ККД ПРИ НОМІНАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

7.1. Електричні втрати в обмотці статора при номінальному навантаженні, Вт,

$$P_{el\ s\ nom} = 3I_{sN}^2 \cdot R_s.$$

7.2. Втрати на збудження при номінальній напрузі, Вт,

$$P_{E\ nom} = I_{EN}^2 \cdot R_E + 2\Delta U_E \cdot I_{EN}.$$

7.3. Маса спинки статора, кг,

$$m_{ys} = \gamma_{Fe} \cdot l_{ef} \cdot \pi(d_{se} - h_{ys})h_{ys} \cdot 10^{-9},$$

де γ_{Fe} – питома маса електротехнічної сталі, становить $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

7.4. Магнітні втрати в спинці статора при номінальній напрузі, Вт,

$$P_{mag\ ys} = k_{ys} \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{yso}^2 \cdot m_{ys},$$

де k_{ys} – коефіцієнт, що враховує зростання втрат від часткового замикання листів та зміну структури сталі при виготовленні осердя, дорівнює 1,3;

$p_{1,0/50}$ – питомі втрати в сталі при магнітній індукції 1 Тл та частоті перемагнічування 50 Гц; для сталі 2211 становлять 2,6 Вт/кг.

7.5. Маса зубців статора, кг,

$$m_{ts} = \gamma_{Fe} \cdot l_{ef} \cdot h_s \cdot b_{ts\ 1/3} \cdot Q_s \cdot 10^{-9}.$$

7.6. Магнітні втрати в зубцях статора при номінальній напрузі, Вт,

$$P_{mag\ ts} = k_{ts} \cdot p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts\ 1/3o}^2 \cdot m_{ts},$$

де k_{ts} – коефіцієнт, що враховує зростання втрат від часткового замикання листів та зміну структури сталі при виготовленні зубців, дорівнює 1,7.

7.7. Додаткові поверхневі магнітні втрати в полюсних наконечниках ротора при номінальній напрузі, Вт,

$$P_{mag\ p} = 2p \cdot b_{pe} \cdot l_p (Q_s \cdot n_N)^{1,5} (B_{\delta o} \cdot \tau_s (K_{Cs} - 1))^2 \cdot 10^{-12}.$$

7.8. Механічні втрати (в підшипниках та на тертя обертових частин о повітря), Вт,

$$P_{mec} = 1,8p \cdot \tau_p^3 \cdot \sqrt{l_s} \cdot 10^{-6}.$$

7.9. Додаткові втрати при номінальному навантаженні, Вт:

- при номінальній потужності синхронної машини до 1000 кВт

$$P_{ad\ nom} = 0,005 \cdot m \cdot U_{sN} \cdot I_{sN} \cdot \cos \varphi_N;$$

- при номінальній потужності синхронної машини вище 1000 кВт

$$P_{ad\ nom} = 0,004 \cdot m \cdot U_{sN} \cdot I_{sN} \cdot \cos \varphi_N.$$

7.10. Сумарні втрати потужності при номінальному навантаженні, Вт,

$$\Delta P_{nom} = P_{el\ s\ nom} + P_{E\ nom} + P_{mag\ ys} + P_{mag\ ts} + P_{mag\ p} + P_{mec} + P_{ad\ nom}.$$

7.11. ККД при номінальному навантаженні:

➤ для генератора
$$\eta_N = 1 - \frac{\Delta P_{nom}}{S_N \cdot 10^3 + \Delta P_{nom}};$$

➤ для двигуна
$$\eta_N = 1 - \frac{\Delta P_{nom}}{P_N \cdot 10^3}.$$

Отримане значення не має відрізнятися від гарантованого ККД більш ніж на 2 %.

7.12. Вхідна потужність синхронного двигуна в номінальному режимі, Вт,

$$P_{inN} = \frac{P_N}{\eta_N}.$$

8. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК

8.1. Питомий тепловий потік від втрат в статорі, Вт/мм²,

$$\Phi_{th\ s} = \frac{P_{el\ s\ nom} \frac{l_s}{l_s + l_{fh}} + P_{mag\ ys} + P_{mag\ ts} + P_{ad\ nom}}{\pi d_s \cdot l_s}.$$

8.2. Коефіцієнт тепловіддачі поверхні статора, Вт/(°С·мм²),

$$\alpha_{th\ s} = \alpha_{th\ s0} \left(1 + 0,1 \frac{\pi (d_s - 2\delta) n_N \cdot 10^{-3}}{60} \right),$$

де $\alpha_{th\ s0}$ – коефіцієнт теплопередачі нагрітої поверхні статора при спокійному

повітрі, при $\frac{l_s}{\tau_p} \leq 2$ становить $8 \cdot 10^{-5}$ Вт/(°С·мм²), при $2 < \frac{l_s}{\tau_p} \leq 4$ – $6,67 \cdot 10^{-5}$ Вт/(°С·мм²), при $\frac{l_s}{\tau_p} > 4$ – $5,7 \cdot 10^{-5}$ Вт/(°С·мм²).

8.3. Перевищення температури сталі осердя статора над температурою охолодного повітря, °С,

$$\Delta\theta_s = \frac{\Phi_{th s}}{\alpha_{th s}}.$$

8.4. Питомий тепловий потік з зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора, Вт/мм²,

$$\Phi_{th fh} = \frac{A_s \cdot J_s \cdot \tau_s}{2\gamma_{Cu120^\circ C} (h_s + b_s)} \cdot 10^{-2},$$

де $\gamma_{Cu120^\circ C}$ – питома електропровідність міді, при максимально припустимій температурі ізоляції класу нагрівостійкості В 120°С становить 4020 см/(Ом·мм²).

8.5. Коефіцієнт теплопередачі зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора, Вт/(°С·мм²),

$$\alpha_{th fh} = \alpha_{th fh0} \left(1 + 0,07 \frac{\pi(d_s - 2\delta)n_N \cdot 10^{-3}}{60} \right),$$

де $\alpha_{th fh0}$ – коефіцієнт теплопередачі нагрітої поверхні лобових частин обмотки статора при спокійному повітрі, становить $1,33 \cdot 10^{-5}$ Вт/(°С·мм²).

8.6. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора над температурою охолодного повітря, °С,

$$\Delta\theta_{fh} = \frac{\Phi_{th fh}}{\alpha_{th fh}}.$$

8.7. Перепад температури в пазовій ізоляції обмотки статора, °С,

$$\Delta\theta_{is} = \frac{k_{Pad} \cdot A_s \cdot J_s \cdot \tau_s (b_s - N_{elb} \cdot b_{sel})}{4\gamma_{Cu120^\circ C} \cdot \lambda_{is} (h_s + b_s)} \cdot 10^{-2},$$

де k_{Pad} – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати в обмотці статора, знаходиться в межах 1,03–1,10;

λ_{is} – теплопровідність ізоляції, для обраної конструкції ізоляції становить

$1,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/(°С·мм).

Для ізоляції класу нагрівостійкості В величина $\Delta\theta_{is}$ не повинна перевищувати 35 °С.

8.8. Середнє перевищення температури міді обмотки статора над температурою охолодного повітря, °С,

$$\Delta\theta_{Cu s} = \frac{(\Delta\theta_s + \Delta\theta_{is})l_s + (\Delta\theta_{fh} + \Delta\theta_{is})l_{fh}}{l_s + l_{fh}}.$$

Для ізоляції класу нагрівостійкості В допустиме перевищення температури над температурою охолодного повітря становить 80 °С.

8.9. Питомий тепловий потік з бокової поверхні котушки обмотки збудження, Вт/мм²,

$$\Phi_{th E} = \frac{b_E \cdot J_E^2}{\gamma_{Cu120^\circ C}} \cdot 10^{-1}.$$

8.10. Коефіцієнт теплопередачі бокової поверхні котушки обмотки збудження, Вт/(°С·мм²),

$$\alpha_{th E} = \alpha_{th Ev} \left(\frac{l_s}{\tau_p} \right)^{-0,4},$$

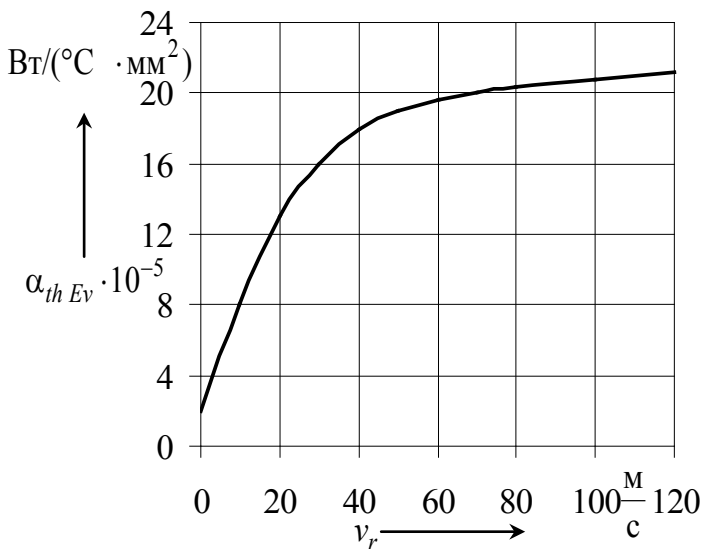


Рисунок 8.1 – Залежність $\alpha_{th Ev}(v_r)$

де $\alpha_{th Ev}$ – коефіцієнт теплопередачі нагрітої поверхні котушки обмотки збудження при перемішуванні повітря зі швидкістю v_r (рис. 8.1).

8.11. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора над температурою охолодного повітря, °С, $\Delta\theta_E = \frac{\Phi_{th E}}{\alpha_{th E}}$.

Для ізоляції класу нагрівостійкості В для однорядних котушок з неізольованими провідниками допустиме перевищення температури над температурою охолодного повітря становить 90 °С.

9. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНИХ ОПОРІВ ОБМОТОК

9.1. Індуктивний опір реакції якоря по поздовжній осі

$$X_{ad*} = \frac{k_{ad} \cdot F_{am}}{F_{\delta nom} + F_{\delta yr nom}}.$$

9.2. Індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі

$$X_{aq*} = \frac{k_{aq} \cdot F_{am}}{F_{\delta nom} + F_{\delta yr nom}} \cdot \frac{1 + K_C}{2},$$

де k_{aq} – коефіцієнт реакції якоря по поперечній осі, визначається з рис. 9.1.

9.3. Індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі

$$X_{d*} = X_{\sigma s*} + X_{ad*}.$$

Зазвичай в синхронних явнопольосних машинах середньої та великої потужності опір X_{d*} складає 1,0–1,7.

9.4. Індуктивний опір обмотки статора по поперечній осі

$$X_{q*} = X_{\sigma s*} + X_{aq*}.$$

Зазвичай в синхронних явнопольосних машинах середньої та великої потужності опір X_{q*} становить 0,6–1,0.

9.5. Індуктивний опір розсіяння обмотки збудження, зведений до обмотки статора,

$$X_{\sigma E*} = \frac{k_{ad} \cdot F_{am}}{\Phi_{\delta o}} \left(\frac{\Lambda_{p1}}{2,1} + \frac{\Lambda_{p2}}{2,5} \right).$$

9.6. Коефіцієнт розподілу демпферної обмотки

$$K_{ddm} = \frac{\sin \frac{90^\circ \cdot \tau_r \cdot N_{dm}}{\tau_p}}{N_{dm} \cdot \sin \frac{90^\circ \cdot \tau_r}{\tau_p}}.$$

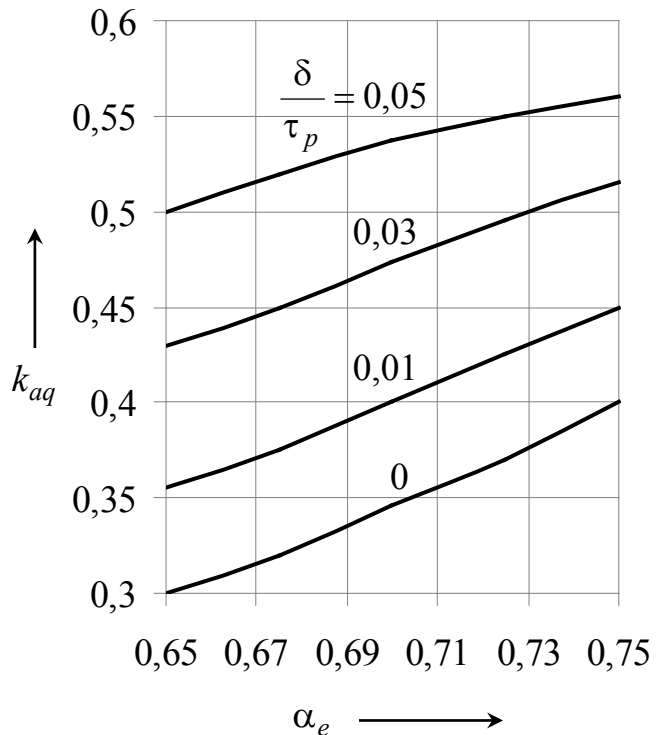


Рисунок 9.1 – Залежність k_{aq} від α_e та $\frac{\delta}{\tau_p}$

9.7. Коефіцієнт розсіяння лобових частин демпферної обмотки по поздовжній осі C_d (табл. 9.1).

Таблиця 9.1 – Формули для визначення коефіцієнтів C_d та C_q

Кількість стрижнів демпферної обмотки N_{dm}	Коефіцієнт C_d	Коефіцієнт C_q
5	$C_d = 4,8 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 0,14$	$C_q = -7,8 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 2,6$
6	$C_d = 8,9 \frac{\tau_r}{\tau_p} - 0,09$	$C_q = -10,7 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 2,9$
7	$C_d = 20 \frac{\tau_r}{\tau_p} - 0,7$	$C_q = -16 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 3,6$
8	$C_d = 24 \frac{\tau_r}{\tau_p} - 0,8$	$C_q = -18 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 3,8$
9	$C_d = 32 \frac{\tau_r}{\tau_p} - 1$	$C_q = -20 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 4,1$
10	$C_d = 34 \frac{\tau_r}{\tau_p} - 1$	$C_q = -23 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 4,4$
11	$C_d = 38 \frac{\tau_r}{\tau_p} - 1$	$C_q = -24 \frac{\tau_r}{\tau_p} + 4,4$

9.8. Активний опір демпферної обмотки по поздовжній осі

$$R_{dmd*} = 2,16 \rho_{b/Cu} \frac{F_{am}}{\Phi_{\delta o} \cdot f \cdot N_{dm} (1 - K_{ddm})} \cdot \left(\frac{l_{dm}}{\pi d_{dm}^2} + \frac{\tau_p \cdot C_d}{S_{fhr}} \right) \cdot 10^{-5},$$

де $\rho_{b/Cu}$ – відношення питомого опору матеріалу демпферної обмотки до питомого опору міді, для латунної демпферної обмотки дорівнює 4.

9.9. Коефіцієнт розсіяння лобових частин демпферної обмотки по поперечній осі C_q визначається по табл. 9.1.

9.10. Активний опір демпферної обмотки по поперечній осі

$$R_{dmq*} = 2,16\rho_{b/Cu} \frac{F_{am}}{\Phi_{\delta o} \cdot f \cdot N_{dm}(1 + K_{ddm})} \cdot \left(\frac{l_{dm}}{\pi d_{dm}^2} + \frac{\tau_p \cdot C_q}{S_{fhr}} \right) \cdot 10^{-5}.$$

9.11. Магнітна провідність демпферної обмотки по поздовжній осі, Гн,

$$\Lambda_{\sigma dmd} = \left[\frac{l_p}{N_{dm}} \left(0,75 - \frac{b_{dmr}}{2d_{dmr}} + \frac{h_{dmr}}{b_{dmr}} + \frac{\tau_r}{16,5\delta} \right) + 0,19 \frac{\tau_r \cdot C_d}{N_{dm}} \right] \cdot 10^{-9}.$$

9.12. Магнітна провідність демпферної обмотки по поперечній осі, Гн,

$$\Lambda_{\sigma dmq} = \left[\frac{l_p}{N_{dm}} \left(0,75 - \frac{b_{dmr}}{2d_{dmr}} + \frac{h_{dmr}}{b_{dmr}} + \frac{\tau_r}{16,5\delta} \right) + 0,19 \frac{\tau_r \cdot C_q}{N_{dm}} \right] \cdot 10^{-9}.$$

9.13. Індуктивний опір розсіяння повної демпферної обмотки по поздовжній осі

$$X_{\sigma dmd*} = 3,9 \frac{F_{am}}{\Phi_{\delta o}(1 - K_{ddm})} \Lambda_{\sigma dmd}.$$

9.14. Індуктивний опір розсіяння повної демпферної обмотки по поперечній осі

$$X_{\sigma dmq*} = 3,9 \frac{F_{am}}{\Phi_{\delta o}(1 + K_{ddm})} \Lambda_{\sigma dmq}.$$

9.15. Перехідний індуктивний опір по поздовжній осі

$$X'_{d*} = X_{\sigma s*} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad*}} + \frac{1}{X_{\sigma E*}}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополосних машинах середньої та великої потужності опір X'_{d*} становить 0,16–0,35.

9.16. Понадперехідний індуктивний опір по поздовжній осі

$$X''_{d*} = X_{\sigma s*} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad*}} + \frac{1}{X_{\sigma E*}} + \frac{1}{X_{\sigma dmd*}}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополосних машинах середньої та великої потужності опір X''_{d*} становить 0,1–0,19.

9.17. Понадперехідний індуктивний опір по поперечній осі

$$X''_{q*} = X_{\sigma s*} + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq*}} + \frac{1}{X_{\sigma dmq*}}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополюсних машинах середньої та великої потужності опір X_{q*}'' становить 0,11–0,23.

9.18. Індуктивний опір зворотної послідовності фаз

$$X_{2*} = \frac{X_{d*}'' + X_{q*}''}{2}.$$

Зазвичай в синхронних явнополюсних машинах середньої та великої потужності опір X_{2*} становить 0,1–0,21.

10. ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛИХ ЧАСУ

10.1. Стала часу обмотки збудження при розімкнутих обмотці статора та демпферній обмотці, с,

$$T_{Eo} = \frac{X_{ad*} + X_{\sigma E*}}{2\pi f \cdot R_{E*}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополюсних машинах середньої та великої потужності стала часу T_{Eo} становить 0,8–2,5 с.

10.2. Перехідна стала часу по поздовжній осі при замкненій обмотці статора та відсутності демпферної обмотки, с,

$$T_d' = \frac{X_{d*}'}{2\pi f \cdot R_{E*}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополюсних машинах середньої та великої потужності стала часу T_d' становить 0,08–1,5 с.

10.3. Понадперехідна стала часу по поздовжній осі при замкнених обмотках статора та збудження, с,

$$T_d'' = \frac{X_{d*}''}{2\pi f \cdot R_{dmd*}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополюсних машинах середньої та великої потужності стала часу T_d'' становить 0,05–0,06 с.

10.4. Понадперехідна стала часу по поперечній осі при замкненій обмотці статора, с,

$$T_q'' = \frac{X_{q*}''}{2\pi f R_{dmq*}}.$$

10.5. Стала часу обмотки статора при замкненій обмотці збудження, с,

$$T_s = \frac{X_{2*}}{2\pi f R_{s*}}.$$

Зазвичай в синхронних явнополюсних машинах середньої та великої потужності стала часу T_s становить 0,1–0,2 с.

11. ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ВЕЛИЧИН У СИСТЕМІ ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЬ

11.1. Базисні значення величин

11.1.1. Базисне значення струму статора, А,

$$I_{sb} = I_{sN}.$$

11.1.2. Базисне значення напруги, В,

$$U_b = U_{sN}.$$

11.1.3. Базисне значення потужності, Вт,

$$P_b = m \cdot U_b \cdot I_{sb}.$$

11.1.4. Базисне значення струму збудження (нормальний струм збудження), А, $I_{Eb} = I_{Eo}$.

11.2. Поточні значення величин

11.2.1. Струм статора, А,

$$I_s = I_{s*} \cdot I_{sb},$$

де I_{s*} – значення струму статора у відносних одиницях.

11.2.2. Напруга, В,

$$U = U_* \cdot U_b = \sqrt{3} U_{s*} \cdot U_b,$$

де U_* та U_{s*} – значення лінійної та фазної напруг, відповідно, у відносних одиницях.

11.2.3. Активна потужність, Вт,

$$P = P_* \cdot P_b.$$

де P_* – значення активної потужності у відносних одиницях.

11.2.4. Струм збудження, А,

$$I_E = I_{E*} \cdot I_{Eb},$$

де I_{E*} – значення струму збудження у відносних одиницях.

12. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ АВТОНОМНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

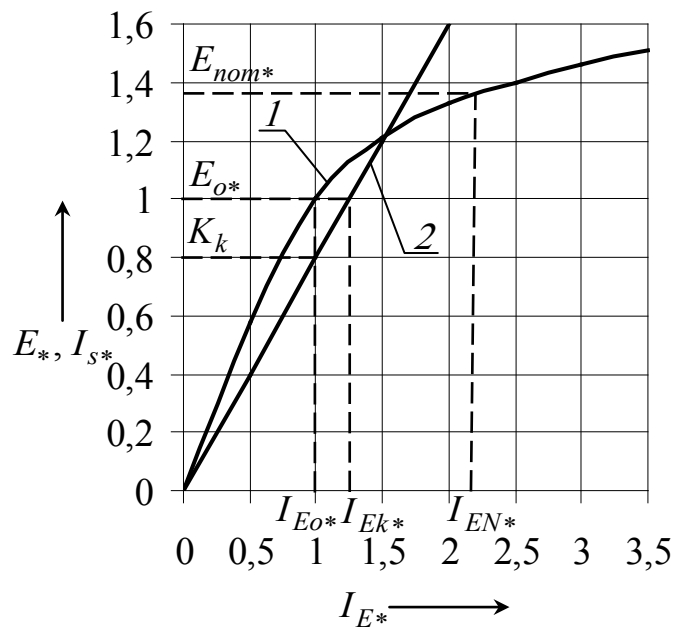
12.1. Характеристика неробочого ходу та характеристика короткого замикання

Характеристика неробочого ходу $E_*(I_{E*})$ та характеристика короткого замикання $I_{S*}(I_{E*})$ будуються в одній координатній системі. При побудові цих характеристик рекомендується обрати масштаб: по осі I_{E*} – 50 мм/в.о., по осі E_*, I_{S*} – 100 мм/в.о.

Характеристика неробочого ходу $E_*(I_{E*})$ будується за точками, отриманими при магнітному розрахунку (див. табл. 5.3).

Характеристикою короткого замикання $I_{S*}(I_{E*})$ є пряма лінія, тому вона будується за двома точками: перша точка – початок координат, друга – точка з координатами $(1; K_k)$.

Загальний вигляд характеристик наведено на рис. 12.1.



- 1 – характеристика неробочого ходу
- 2 – характеристика короткого замикання

Рисунок 12.1 – Характеристики неробочого ходу та короткого замикання

12.2. Регулювальна характеристика

Регулювальна характеристика $I_E(I_s)$ будується для номінальної напруги U_N та значень коефіцієнта потужності $\cos\varphi_N$ та 1 (рис. 12.2).

Для отримання регулювальних характеристик при значеннях коефіцієнта потужності $\cos\varphi_N$ та 1 для напруги $U_{s^*} = 1$, кутів фазового зсуву напруги відносно струму $\varphi = \arccos(\cos\varphi_N)$ та 0° та струмів $I_{s^*} = 0,4; 0,7; 1,0; 1,1$ за допомогою векторної діаграми Блонделя (додаток А) заповнюється дві таблиці за зразком табл. 12.1, за якими будуються регулювальні характеристики $I_E(I_s)$ в одних координатних осях для значень коефіцієнта потужності $\cos\varphi_N$ та 1.

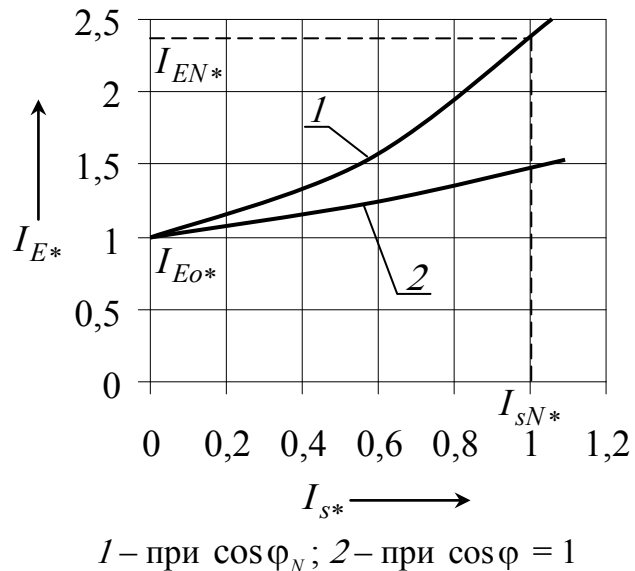


Рисунок 12.2 – Регулювальні характеристики

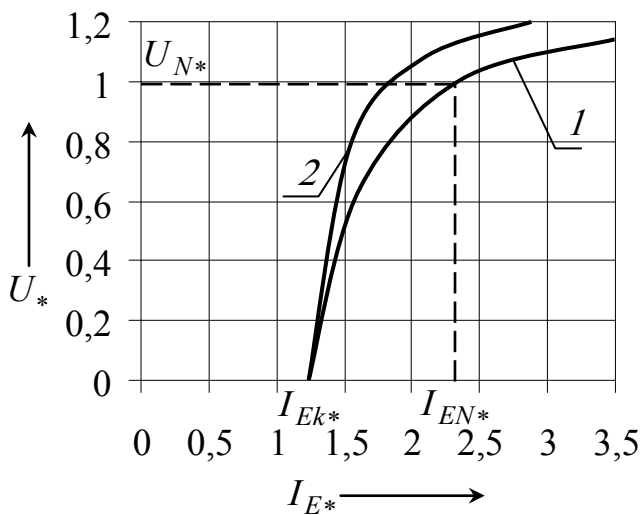
Таблиця 12.1 – Регулювальна характеристика

I_{s^*} , в.о.	0	0,4	0,7	1,0	1,1
I_s , А	0			I_{sN} (при $\cos\varphi_N$)	
I_{E^*} , в.о.	1				
I_E , А	I_{Eo}			I_{EN} (при $\cos\varphi_N$)	

12.3. Навантажувальна характеристика

Навантажувальна характеристика $U(I_E)$ будується для номінального струму I_N та значень коефіцієнта потужності $\cos\varphi_N$ та 1 (рис. 12.3).

Для отримання навантажувальних характеристик при значеннях коефіцієнта потужності $\cos\varphi_N$ та 1 для струму $I_{s^*} = 1$, кутів фазового зсуву напруги відносно струму $\varphi = \arccos(\cos\varphi_N)$ та 0° та напруг $U_{s^*} = 0,4; 0,7; 1,0$ за допомо-



1 – при $\cos \varphi_N$; 2 – при $\cos \varphi = 1$

Рисунок 12.3 – Навантажувальні характеристики

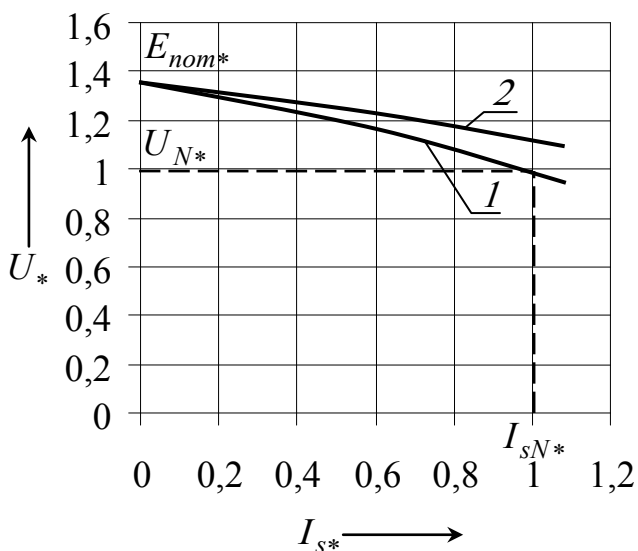
гою векторної діаграми Blondеля заповнюється дві таблиці за зразком табл. 12.2, за якими будуються навантажувальні характеристики $U(I_E)$ в одних координатних осях для значень коефіцієнта потужності $\cos \varphi_N$ та 1.

Значення струму I_{Ek*} визначається за характеристикою короткого замикання для значення струму $I_{s*} = 1,0$.

Таблиця 12.2 – Навантажувальна характеристика

$U_{s*}, \text{в.о.}$	0	0,4	0,7	1,0	1,1
$U, \text{кВ}$	0			U_N (при $\cos \varphi_N$)	
$I_{E*}, \text{в.о.}$	I_{Ek*}				
$I_E, \text{А}$				I_{EN} (при $\cos \varphi_N$)	

12.4. Зовнішня характеристика



1 – при $\cos \varphi_N$; 2 – при $\cos \varphi = 1$

Рисунок 12.4 – Зовнішні характеристики

Зовнішня характеристика $U(I_s)$ будується для номінального струму збудження I_{EN} та значень коефіцієнта потужності $\cos \varphi_N$ та 1 (рис. 12.4).

Зовнішню характеристику можна отримати з серії навантажувальних характеристик, побудованих для декількох значень струму статора та в діапазоні напруг $U_{s*} = (1,0 - E_{nom*})$.

Для запропонованої методики отримання зовнішньої характеристи-

ки рекомендується за допомогою векторних діаграм Блонделя визначити величини для заповнення табл. 12.3. За результатами табл. 12.3 побудувати залежності $U_{s*}(I_{E*})$ при $I_{s*} = \text{const}$ в одних координатних осях (рис. 12.5). Для струму I_{EN*} визначити значення I_{s*} та U_{s*} , заповнити табл. 12.4, за якою побудувати зовнішню характеристику при $\cos\varphi_N$.

Провести аналогічні побудови для отримання зовнішньої характеристики при $\cos\varphi = 1$.

Таблиця 12.3 – Допоміжні розрахунки для зовнішньої характеристики

I_{s*} , в.о.	0,4	0,7	1,0	1,1
I_{E*} , в.о.	при $U_{s*} = 1,0$			
I_{E*} , в.о.	при $1,0 < U_{s*} < E_{nom*}$			
I_{E*} , в.о.	при $U_{s*} = E_{nom*}$			

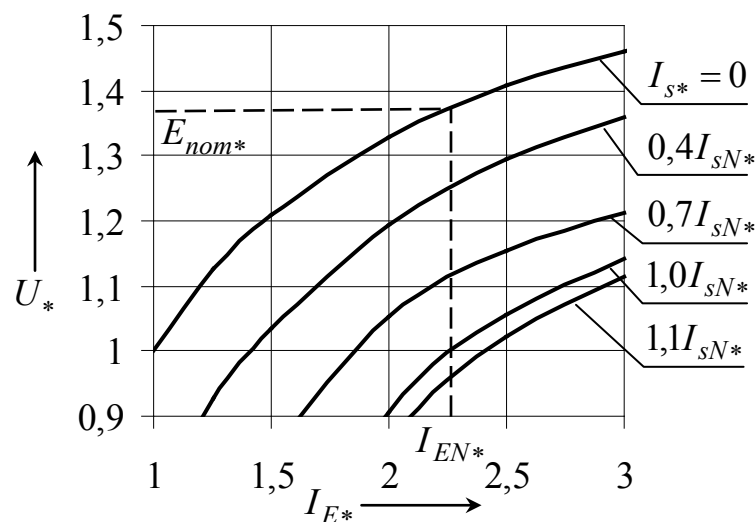


Рисунок 12.5 – Частки навантажувальних характеристик

Таблиця 12.4 – Зовнішня характеристика

I_{s*} , в.о.	0	0,4	0,7	1,0	1,1
I_s , А	0			I_{sN} (при $\cos\varphi_N$)	
U_{s*} , в.о.	E_{nom*}			1,0 (при $\cos\varphi_N$)	
U , кВ				U_N (при $\cos\varphi_N$)	

13. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ З МЕРЕЖЕЮ НЕСКІНЧЕННОЇ ПОТУЖНОСТІ

13.1. Кутова характеристика

Кутовою характеристикою є залежність активної потужності від кута навантаження $P(\theta)$ при $U_N = \text{const}$, $I_{EN} = \text{const}$, $f = \text{const}$, де θ – кут навантаження. Ця характеристика може бути побудована за аналітичним виразом

$$P_* = \frac{m_s E'_{nom*} U_{s*}}{X_{d*}} \sin\theta + \frac{m_s U_{s*}^2}{2} \left(\frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \sin 2\theta,$$

де E'_{nom*} – значення ЕРС, яке визначається за ненасиченою характеристикою неробочого ходу (дотична до початкової ділянки характеристики неробочого ходу) для струму I_{EN*} .

Зважаючи на те, що $U_{sN*} = 1,0$, формула спрощується:

$$P_* = \frac{m_s \cdot E'_{nom*}}{X_{d*}} \sin\theta + \frac{m_s}{2} \left(\frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \sin 2\theta.$$

Рекомендується вести розрахунок з кроком θ в 15 ел. град. За результатами розрахунку будується залежність $P(\theta)$ (рис. 13.1).

Критичний кут навантаження при номінальній напрузі

$$\theta_{cr} = \arccos \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{m_s \cdot E'_{nom*}}{X_{d*}} \right)^2 + 32 \left(\frac{m_s}{2} \left(\frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \right)^2} - \frac{m_s \cdot E'_{nom*}}{X_{d*}}}{8 \left(\frac{m_s}{2} \left(\frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \right)} \right).$$

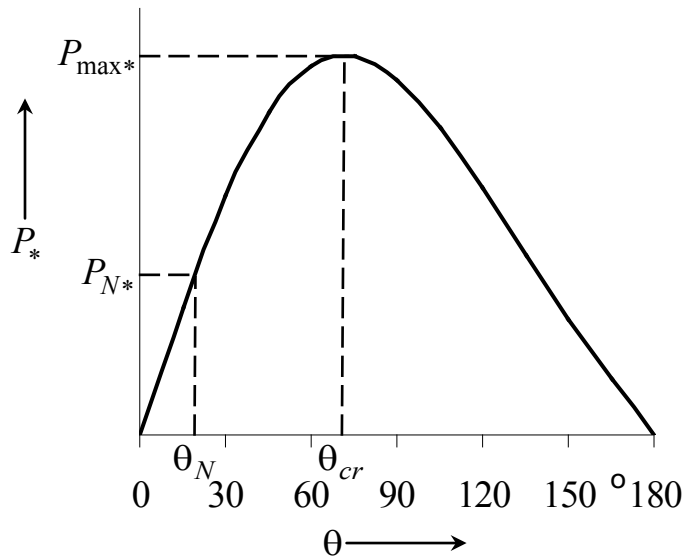


Рисунок 13.1 – Кутова характеристика

Максимальна потужність при номінальній напрузі

$$P_{\max*} = \frac{m_s \cdot E'_{nom*}}{X_{d*}} \sin \theta_{cr} + \frac{m_s}{2} \left(\frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \sin 2\theta_{cr}.$$

Коефіцієнт статичної стійкості

$$K_{st} = P_{\max*}.$$

13.2. U -подібна характеристика

U -подібна характеристика $I_s(I_E)$ (рис. 13.2) визначається для номінальної напруги U_N та номінальної активної потужності P_N за результатами розрахунків табл. 13.1. Разом з U -подібною характеристикою будується графік залежності $\cos \varphi(I_{E*})$. Для визначення струмів збудження I_{E*} необхідно побудувати векторні діаграми Блонделя для напруги $U_{N*} = 1$, зазначених $\cos \varphi$, кутів φ та визначених струмів I_{s*} .

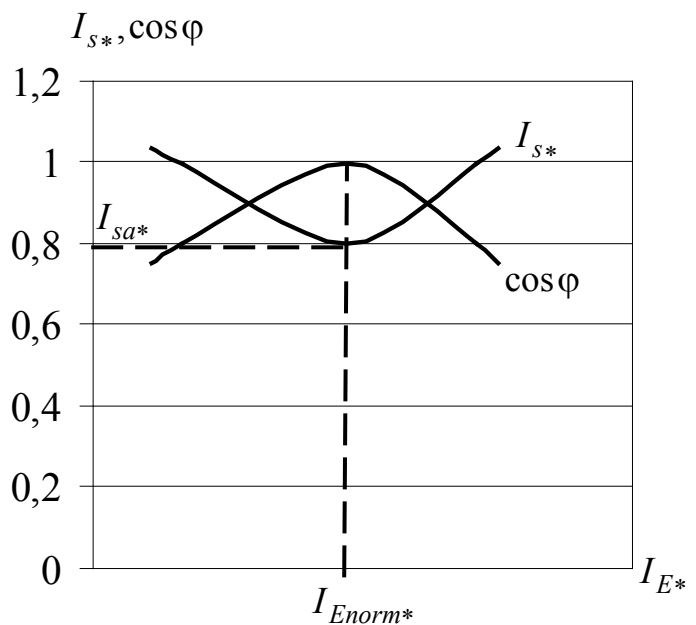


Рисунок 13.2 – U -подібна характеристика

Таблиця 13.1 – U -подібна характеристика

$\cos \varphi$	0,75	$\cos \varphi_N$	1	$\cos \varphi_N$	0,75
$\sin \varphi$	-0,66	$-\sin \varphi_N$	0	$\sin \varphi_N$	0,66
$\varphi, ^\circ$	-41	$-\varphi_N$	0	φ_N	41
$I_{sa*} = \cos \varphi_N$					
$I_{sr*} = \sin \varphi$					
$I_{s*} = \sqrt{I_{sa*}^2 + I_{sr*}^2}$					
I_{E*}					
I_E, A					

14. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДВИГУНА

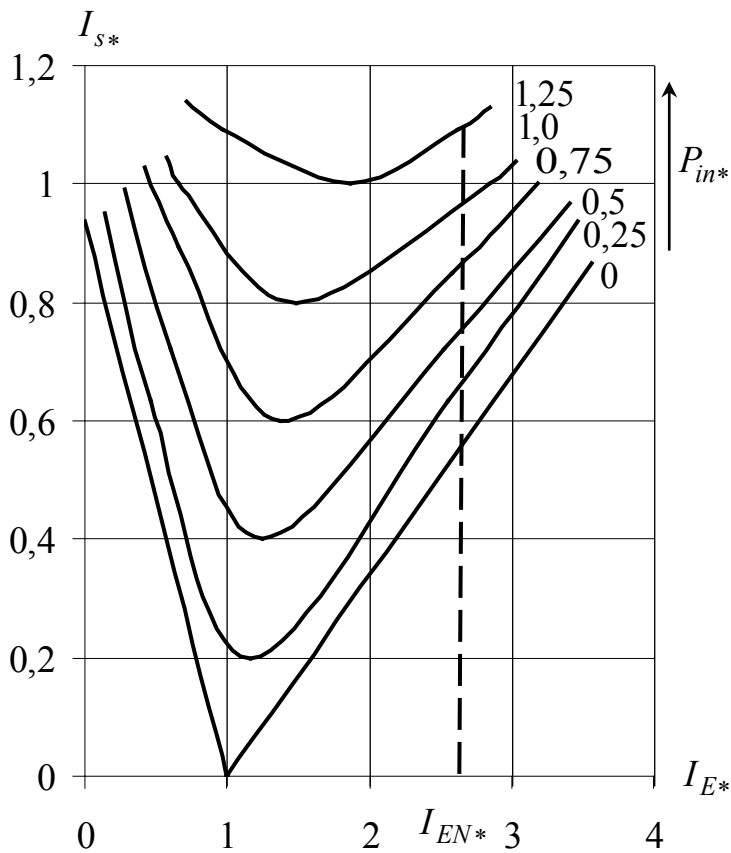


Рисунок 14.1 – Серія U -подібних характеристик

14.1. Кутова характеристика

Кутова характеристика синхронного двигуна визначається за методикою, викладеною в підрозд. 13.1.

14.2. U -подібна характеристика

Для синхронного двигуна рекомендується побудувати серію U -подібних характеристик (рис. 14.1) за методикою, викладеною в підрозд. 13.2, при номінальній напрузі $U_{N*} = 1$ для значень струму

$$I_{sa*} = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0;$$

1,25) $\cos \varphi_N$. Значення струму I_{sq*} відповідають значенням вхідної потужності $P_{in} = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25)P_{inN}$. При розрахунку дотримуватись діапазону змінювання $\cos \varphi$, який становить (0,35–1,0) при $P_{in} = 0$ та (0,85–1,0) при $P_{in} = (0,25–1,25)P_{inN}$.

14.3. Робочі характеристики синхронного двигуна

Робочі характеристики $P_{in}, I_s, \cos \varphi, \eta, M(P)$ визначаються для номінальної напруги U_N та номінального струму збудження I_{EN} за допомогою серії отриманих U -подібних характеристик (рис. 14.1). За серією U -подібних характеристик для струму I_{EN*} визначаються значення струмів I_{s*} для кожного значення потужності P_{in*} . Подальший розрахунок робочих характеристик ведеться за табл. 14.2, за якою будуються робочі характеристики (рис. 14.2).

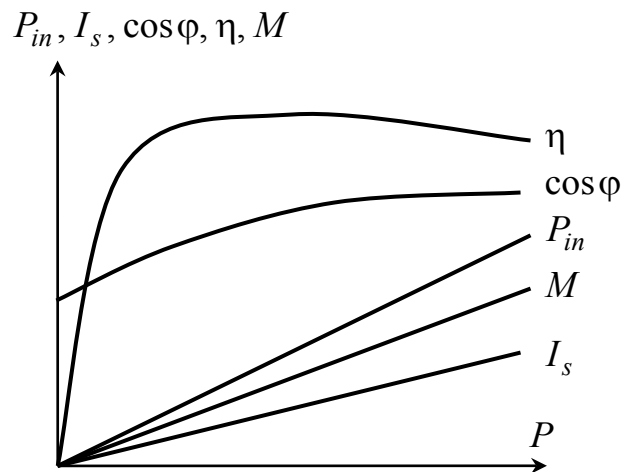


Рисунок 14.2 – Робочі характеристики

Таблиця 14.2 – Робочі характеристики

Величина	Значення					
	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
Вхідна потужність P_{in*} , в.о.						
Вхідна потужність P_{in} , Вт						
Струм статора I_{s*} , в.о.						
Струм статора I_s , А						
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi = \frac{P_{in*}}{I_{s*}}$						
Електричні втрати $P_{el s} = I_{s*}^2 \cdot P_{el s nom}$, Вт						
Додаткові втрати $P_{ad} = I_{s*}^2 \cdot P_{ad nom}$, Вт						
Втрати неробочого ходу						
$\Delta P_o = P_{E nom} + P_{magys} + P_{magts} + P_{mag p} + P_{mec}$, Вт						

Закінчення табл. 14.2

Величина	Значення					
Втрати потужності $\Delta P = P_{el\ s} + P_{ad} + \Delta P_o$, Вт						
Вихідна потужність $P = P_{in} - \Delta P$, Вт						
ККД $\eta = \frac{P}{P_{in}}$, в.о.						
Момент на валу $M = \frac{60P}{2\pi n_N}$, Н·м						

15. КОНСТРУКЦІЯ СИНХРОННОЇ ЯВНОПОЛЮСНОЇ МАШИНИ

Загальний вигляд конструкції синхронної явнопольосної машини наведений на рис. 15.1 та рис. 15.2.

Активними частинами статора 1 є осердя статора та обмотка. Осердя статора складається з окремих сегментів листової електротехнічної сталі. Сегменти утворюють кільцеві пакети, які закріплюються в корпусі статора 2 за допомогою стяжних болтів на пружинах. Пакети осердя статора розділяються вентиляційними каналами, які створюються сталевими розпірками.

Обмотка статора вкладається до відкритих пазів осердя статора. В пазовій частині обмотка закріплюється клинами, лобові частини обмотки кріпляться до бандажних сталевих ізольованих кілець. Кількість бандажних кілець визначається з розрахунку – одне кільце на 100 мм довжини вильоту лобової частини.

Корпус статора 2 являє собою зварну конструкцію з листової сталі з отворами для виходу охолодного повітря. Для захисту лобових частин обмотки статора від попадання великих предметів встановлюються захисні роз'ємні кожухи з отворами для входу-виходу охолодного повітря. Кожухи виконуються з листової конструкційної сталі.

Коробка виведень обмотки статора 3 виготовляється литтям з чавуну та розташовується в нижній частині корпусу збоку. Знімна частина коробки – кабельна муфта – заливається кабельною масою. При номінальній напрузі 6,3 кВ вивідні кінці виготовляються з кабелю з напаяними наконечниками. Обмотка статора має три вивідних кінця, які відповідають початку кожної фази.

Ротор синхронної явнопольосної машини складається з корпусу 4, по-

люсів 5 та обмотки збудження 6.

Конструкція корпусу ротора визначається частотою обертання:

1) для швидкохідних машин корпус ротора являє собою шихтовану або масивну $2p$ -гранну втулку, напресовану на вал або конструкцію, виготовлену разом з валом;

2) для тихохідних машин корпус ротора являє собою лите або зварне колесо зі спицями та маточиною.

Корпус ротора виконуються зі сталі марки Ст3.

Полюс 5 має прямокутний поперечний переріз, складається з листів низьковуглеродної сталі Ст3 товщиною 1 або 1,5 мм. На торцях полюса розташовані фланці, що утримують листи полюса в запресованому стані за допомогою заклепок або шпильок. До круглих отворів полюсного наконечника вкладається демпферна обмотка з круглих мідних або латунних стрижнів, які з торців приварюються до сегментів прямокутного перерізу. З'єднуючись внапуск за допомогою болтів, сегменти створюють короткозамикальні кільця.

Обмотка збудження 6 виконується з окремих котушок, які насаджуються на ізолювані полюси та з'єднуються послідовно для забезпечення необхідної полярності магнітного поля. Струм збудження підводиться за допомогою щіткового апарату на контактні кільця від тиристорного збуджувача.

Контактні кільця виконуються зі сталі, насаджуються в гарячому стані на ізолювану сталеву втулку.

Синхронні машини середньої потужності виконуються з горизонтальним валом, закріпленим на двох стоякових підшипниках ковзного тертя 7 з кільцевим змащуванням, встановлених разом зі зварною станиною на фундаментній плиті, яка спирається на фундамент зі спеціального вібростійкого бетону. До фундаменту синхронна машина кріпиться за допомогою анкерних болтів 8.

Вільний кінець вала 9 в залежності від величини моменту на валу може бути циліндричного або фланцевого виконання.

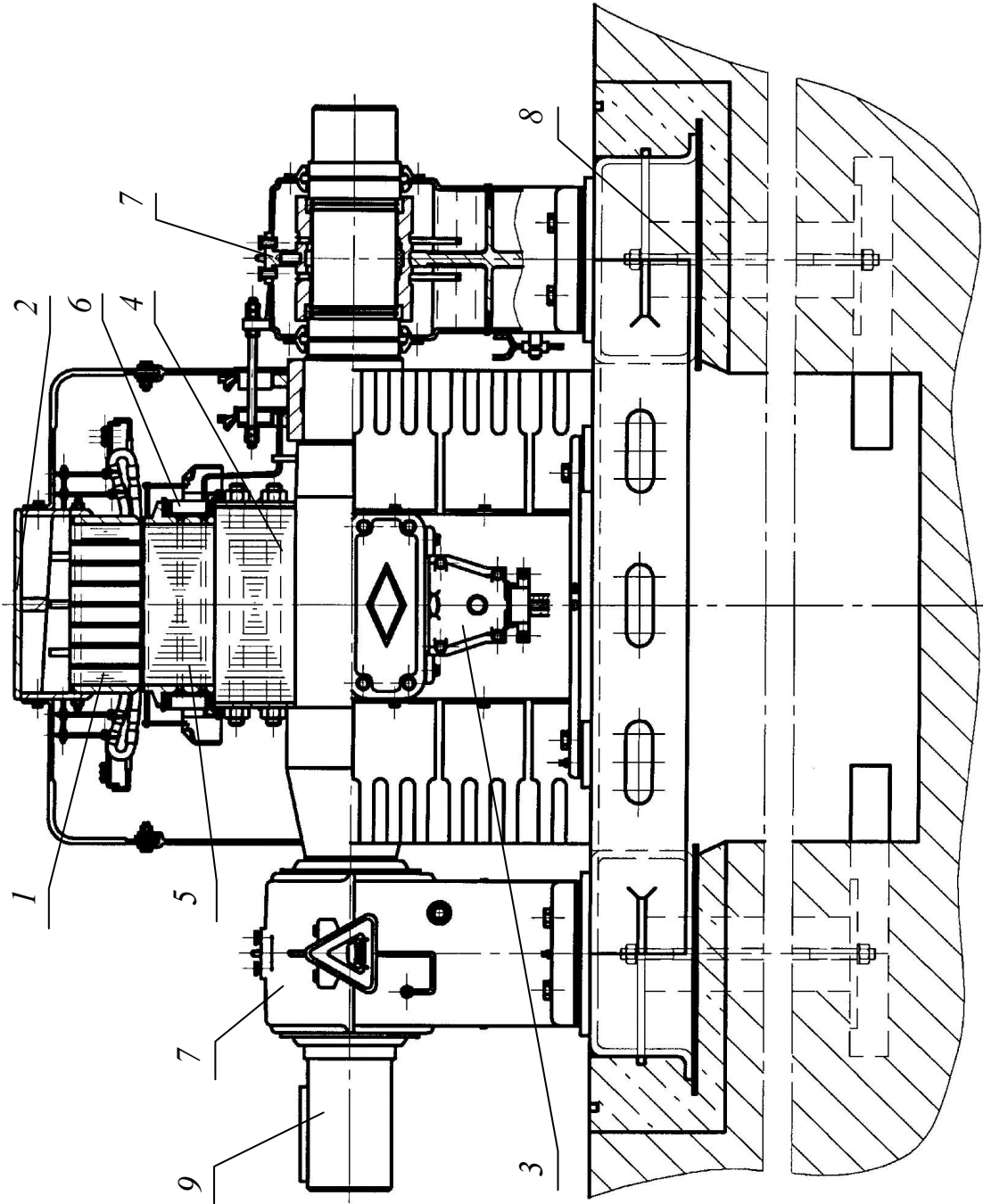


Рисунок 15.1 – Поздовжній розріз синхронної явнополюсної машини

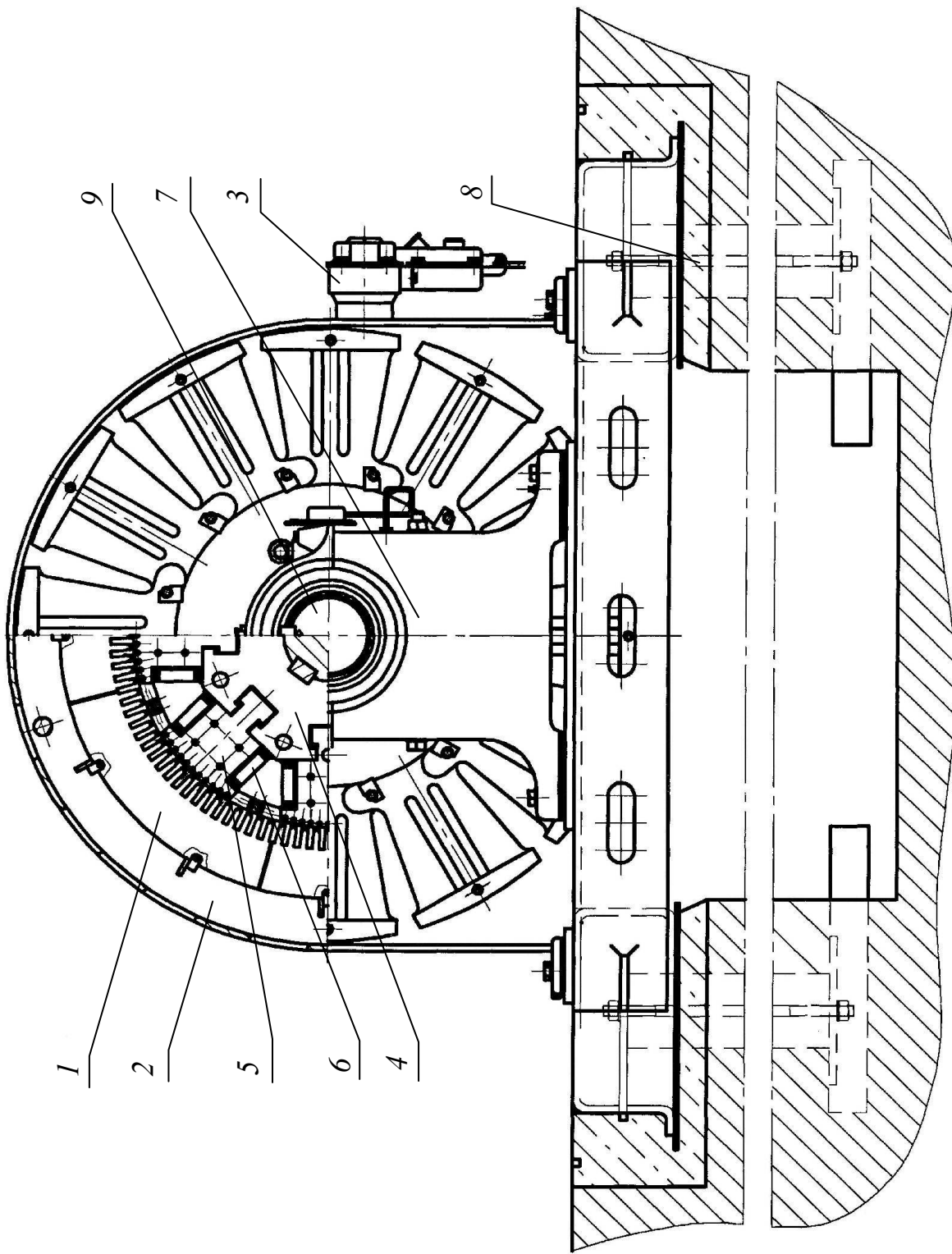


Рисунок 15.2 – Поперечний розріз синхронної явнopolюсної машини

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. - М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
2. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин : учеб. пособие для техникумов / М. М. Кацман. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
3. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова - М.: Энергия, 1980. – 496 с.
4. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин: методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» для студентів і викладачів електротехнічних спеціальностей / уклад. Мілих В. І. – Х. : НТУ «ХП», 2007. – 32 с.
5. Общие требования к текстовым документам. ГОСТ 2.105-95. – (Чинний з 27.06.1996).
6. Конструкторські документи у сфері навчального процесу. Загальні положення. СТВУЗ-ХП-3.03-2002. – (Чинний з 03.12.2002).
7. Конструкторські документи. Формати. Основні написи. Вимоги до виконання. СТВУЗ-ХП-3.04-2002. – (Чинний з 03.12.2002).
8. Конструкторські документи. Креслення. Вимоги до виконання. СТВУЗ-ХП-3.05-2002. – (Чинний з 03.12.2002).
9. Конструкторські документи. у сфері навчального процесу. Схеми. Загальні вимоги до виконання. СТВУЗ-ХП-3.07-2007. – (Чинний з 26.06.2007).
10. Величини та одиниці. Частина 1. Загальні положення. ДСТУ ISO 8000-1 : 2016. (Чинний з 27.12.2016).
11. Величини та одиниці. Частина 6. Загальні положення. ДСТУ ISO 8000-6 : 2016. (Чинний з 27.12.2016).
12. Текстові документи у сфері навчального процесу. Загальні вимоги до виконання. СТЗВО-ХП-3.01-2018. – (Чинний з 28.09.2018).

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А. 1 – Розрахункові дані синхронних машин середньої та великої потужності номінальною напругою 6,3 кВ

S_N , кВ·А	n_N , об/хв	η_N , %	α_e	A_s , А/см	B_δ , Тл	λ	d_{se} , мм	q_s	J_s , А/мм ²	τ_s , мм	$S_{\theta s}$, см ² /Вт	$B_{ts}^{1/3}$, Тл	
750	1000	93,1	0,735	500	0,85	1,44	1180	$4\frac{1}{2}$	5,5	31,0	9,2	1,58	
1300		94,6		450	0,80				5,3		8,5	1,52	
430	750	91,0	0,727	380	0,80	1,35		$3\frac{1}{2}$	6,0	32,2	10,5	1,50	
700		93,5		360	0,77				5,0		8,5	1,45	
380	600	91,0	0,75	370	0,82	1,30		$3\frac{3}{5}$	65,6	25,8	14,0	1,60	
630		93,0		350	0,77				5,0		11,5	1,55	
375	500	91,6	0,72	400	0,80	1,27		$2\frac{1}{2}$	5,9	30,0	12,0	1,40	
500		91,8		380	0,77				5,4		11,0	1,37	
1500	1000	96,2	0,71	570	0,82	1,44		1430	4	5,5	42,0	8,3	1,50
3000		95,0		520	0,79					5,0		6,8	1,45
950	750	93,9	0,735	450	0,80	1,34			$4\frac{1}{2}$	5,5	30,0	9,6	1,53
1600		95,0		400	0,78					5,0		8,1	1,48
750	600	94,3	0,73	430	0,78	1,27	$3\frac{3}{5}$		5,9	32,1	8,0	1,52	
1250		92,5		400	0,75				5,8		7,5	1,46	
650	500	93,2	0,725	430	0,80	1,26	$3\frac{1}{2}$		5,3	27,5	12,2	1,57	
875		92,1		410	0,79				5,2		11,5	1,52	
315	375	90,8	0,73	430	0,74	1,21	$3\frac{3}{4}$		6,0	20,3	11,8	1,65	
600		87,3		390	0,72				6,0		11,0	1,61	
300	300	89,4	0,724	370	0,81	1,19	$2\frac{2}{5}$		6,4	25,3	12,5	1,55	
440		87,3		340	0,78				6,2		11,0	1,50	
2000	750	96,1	0,69	520	0,88	1,34	1730	$4\frac{1}{2}$	5,9	37,1	8,3	1,58	
4000		94,7		500	0,85				5,4		7,5	1,50	
1550	600	95,7	0,7	480	0,9	1,3		$3\frac{3}{5}$	5,9	38,1	8,1	1,60	
2700		94,4		460	0,88				5,6		7,5	1,57	
1150	500	95,3	0,73	470	0,89	1,27		$3\frac{1}{2}$	5,5	33,4	11,5	1,60	
1900		94,0		440	0,84				5,3		9,2	1,50	

Закінчення табл. А.1

S_N , кВ·А	n_N , об/хв	B_{ys} , Тл	R_s^*	X_{cs}^*	K_k	B_p , Тл	N_{dm}	d_{dm} , мм	τ_r , мм	J_E , А/мм ²	b_E , мм	$S_{\theta E}$, см ² /В т
750	1000	1,40	0,012	0,10	0,96	1,50	11	15	40	4,0	31	0,88
1300		1,37	0,017	0,09	0,94	1,47				3,7		0,82
430	750	1,40	0,015	0,10	1,1	1,45	9	14	30	3,8	32,2	1,41
700		1,35	0,026	0,085	1,0	1,40				3,5		1,25
380	600	1,50	0,017	0,09	1,15	1,36	7	13	22	3,6	25,8	1,85
630		1,40	0,024	0,077	0,97	1,30				3,5		1,5
375	500	1,39	0,021	0,13	1,0	1,39	6	12,5	22	3,6	30,0	1,9
500		1,30	0,027	0,12		1,37				3,6		1,7
1500	1000	1,40	0,01	0,34	0,95	1,46	11	16	55	3,3	42	1,0
3000		1,35	0,014	0,11	0,92	1,38				3,1		0,9
950	750	1,38	0,015	0,10	1,00	1,51	11	14	40	3,2	30	1,5
1600		1,35	0,016	0,09	0,96	1,20				3,0		1,2
750	600	1,38	0,015	0,095	1,0	1,40	9	14	30	3,4	32,1	1,8
1250		1,32	0,02	0,08		1,32				3,0		1,5
650	500	1,38	0,018	0,10	1,0	1,39	9	12	25	3,5	27,5	1,75
875		1,36	0,02	0,10		1,37				3,4		1,7
315	375	1,43	0,033	0,13	1,0	1,34	7	11	19,5	3,8	20,3	1,9
600		1,39	0,048	0,11		1,32				3,7		1,8
300	300	1,40	0,03	0,11	1,3	1,30	6	11	14,5	4,0	25,3	2,4
440		1,35	0,036	0,11	1,2	1,25				3,8		2,1
2000	750	1,45	0,01	0,13	1,1	1,50	11	15	55	3,4	37,1	1,0
4000		1,40	0,013	0,10	0,95	1,43				3,1		0,85
1550	600	1,40	0,011	0,11	1,0	1,53	11	14	45	3,2	38,1	1,4
2700		1,36	0,015	0,09		1,48				2,9		1,2
1150	500	1,41	0,012	0,13	1,15	1,40	9	14	35	3,8	33,4	1,4
1900		1,34	0,017	0,096	0,95	1,34				3,33		1,2

Додаток Б

Порядок побудови векторної діаграми Блонделя (рис. Б.1)

1. Обрати масштаб діаграми: для напруги, спаду напруги та ЕРС – 100 мм/в.о., для струмів – 50 мм/в.о.
2. Вектор струму статора \underline{I}_{s*} провести горизонтально.
3. Під кутом φ до вектора \underline{I}_{s*} провести вектор напруги мережі \underline{U}_* .
4. Відкласти вектор напруги \underline{U}_{s*} відносно вектора напруги мережі \underline{U}_* : для генератора $\underline{U}_{s*} = \underline{U}_*$, для двигуна $\underline{U}_{s*} = -\underline{U}_*$.
4. Паралельно вектору \underline{I}_{s*} з кінця вектора \underline{U}_{s*} провести вектор спаду напруги на обмотці статора $\underline{I}_{s*}R_{s*}$.
5. Перпендикулярно до вектора \underline{I}_{s*} з кінця вектора $\underline{I}_{s*}R_{s*}$ провести вектор ЕРС розсіяння обмотки статора $-\underline{E}_{\sigma s*} = j\underline{I}_{s*}X_{\sigma s*}$.
6. На продовженні вектора $\underline{E}_{\sigma s*}$ від його кінця відкласти відрізок $AB = I_{s*}X_{aq*}$.
7. З'єднати початок векторної діаграми з точкою B , отримати промінь OB .
8. З точки A опустити перпендикуляр AC на промінь OB . Вектор OC відповідає вектору ЕРС від основного магнітного потоку по поздовжній осі \underline{E}_{d*} .
9. За отриманим значенням E_{d*} за характеристикою неробочого ходу визначити величину МРС по поздовжній осі F_{d*} .
10. Під випереджувальним кутом 90° до вектора \underline{E}_{d*} відкласти вектор \underline{F}_{d*} .
11. З кінця вектора \underline{I}_{s*} опустити перпендикуляр на напрямок вектора \underline{F}_{d*} та отримати точку D . Вектор OD відповідає вектору складової струму обмотки статора по поздовжній осі \underline{I}_{d*} .
12. Розрахувати МРС реакції якоря по поздовжній осі за формулою $F_{ad*} = \frac{F_{Ek*} \cdot I_{d*}}{K_k \cdot X_{ad*}}$, де F_{Ek*} визначається за характеристикою короткого замикання для струму \underline{I}_{s*} .
13. Паралельно вектору \underline{I}_{d*} з кінця вектора \underline{F}_{d*} відкласти вектор $-\underline{F}_{ad*}$.
14. Побудувати вектор МРС збудження \underline{F}_{E*} відповідно до рівняння

$$\underline{F}_{E^*} = \underline{F}_{d^*} - \underline{F}_{ad^*}.$$

15. Величина струму обмотки збудження у відносних одиницях дорівнює величині МРС збудження у відносних одиницях, $\underline{I}_{E^*} = \underline{F}_{E^*}$.

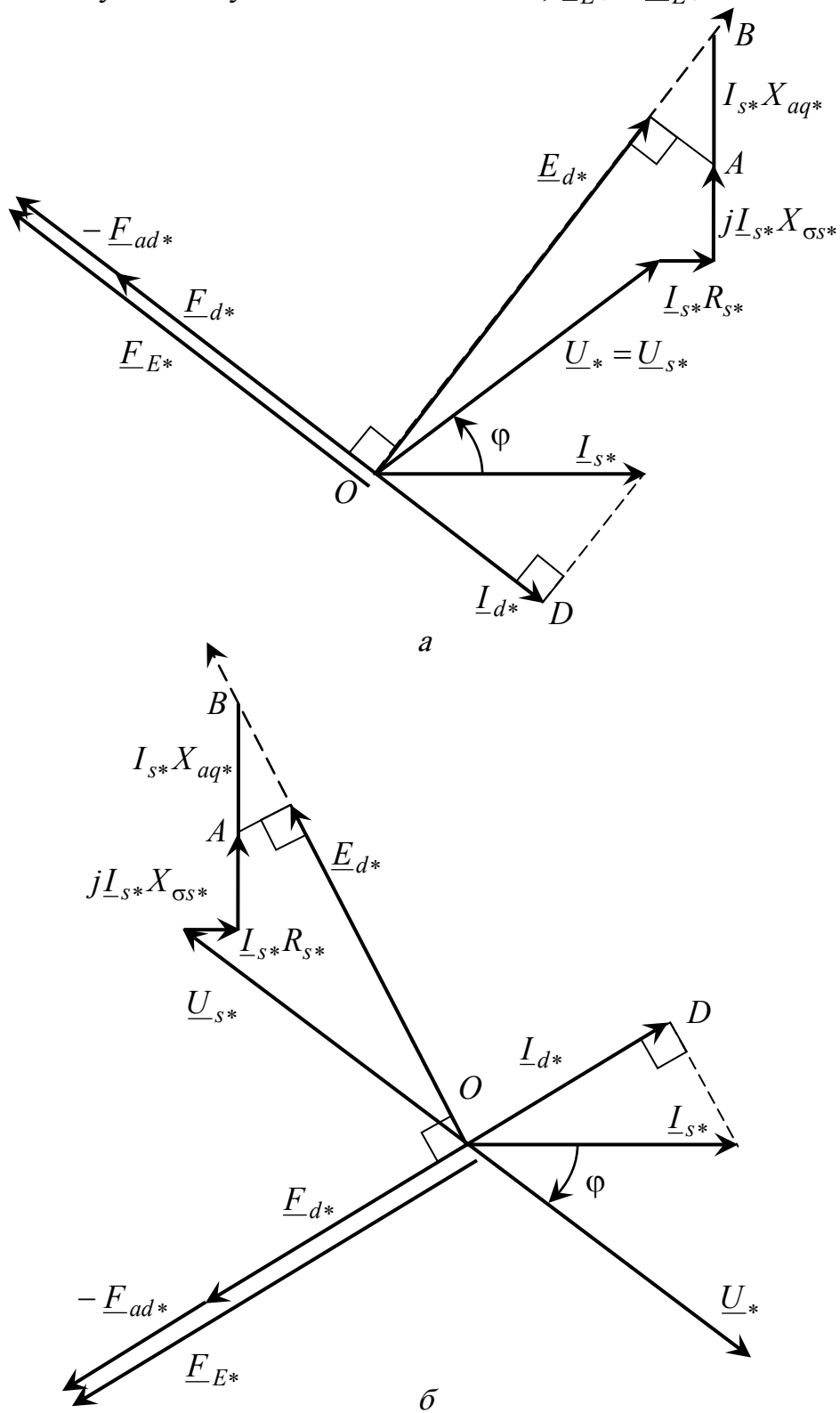


Рисунок Б.1 – Векторні діаграми Blondеля синхронних машин:

a – синхронний генератор; *б* – синхронний двигун

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. Технічні умови.....	5
2. Визначення головних розмірів та електромагнітних навантажень.....	6
3. Проектування статора.....	9
4. Проектування ротора.....	25
5. Магнітний розрахунок.....	30
6. Проектування обмотки збудження.....	40
7. Розрахунок втрат потужності та ККД при номінальному навантаженні.....	45
8. Тепловий розрахунок.....	46
9. Визначення індуктивних опорів обмоток.....	49
10. Визначення сталих часу.....	52
11. Визначення значень величин у системі відносних одиниць.....	53
12. Визначення характеристик синхронного генератора при автономному навантаженні.....	54
13. Визначення характеристик синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності.....	58
14. Визначення характеристик синхронного двигуна.....	60
15. Конструкція синхронної явнополюсної машини.....	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	66
ДОДАТОК А.....	67
ДОДАТОК Б.....	69

Навчальне видання

ПРОЄКТУВАННЯ
СИНХРОННИХ ЯВНОПОЛЮСНИХ
МАШИН

Навчально-методичний посібник

з курсового проєктування

для студентів, що навчаються за спеціальністю

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: ЮР'ЄВА Олена Юріївна

ШИЛКОВА Лариса Василівна

ПОТОЦЬКИЙ Дмитро Васильович

Відповідальний за випуск В. І. Мілих

Роботу до друку рекомендував Б. Г. Любарський

В авторській редакції

План 2020 р., п. 103

Підписано до друку

Друк – ризографія.

Наклад – 100 прим.

. Формат 60x84^{1/16}.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № .

Папір офсетний.

Ум. друк. арк. 7,1.

Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня НТУ «ХП», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2