

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

**Основи автоматизованого проектування електричних машин. Частина 2.
Практичні заняття**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за
спеціальністю*

*141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
освітньою програмою
«Електричні машини і апарати»*

Київ 2022

Основи автоматизованого проектування електричних машин. Частина 2. Практичні заняття [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.О. Реуцький, С.С. Цивінський. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,96 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022 - 77 с.

Електронне мережне навчальне видання

**Основи автоматизованого проектування електричних машин. Частина 2.
Практичні заняття**

Укладачі	Реуцький Микола Олександрович, канд. техн. наук, доц. Цивінський Сергій Станіславович, канд. техн. наук
Відповідальний редактор	Котлярова Вікторія Володимирівна, старший викладач
Рецензент	Островерхов М. Я., Професор д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Представлено методичні рекомендації до вирішення практичних задач щодо проектування силових трансформаторів та електричних машин.

Навчальний посібник призначений для бакалаврів, що навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

Зміст

Титульна сторінка.....	1
Зміст	3
Вступ	4
1. Проектування якірних обмоток електричних машин	5
Контрольні питання до розділу 1	13
2. Розрахунок магнітного кола	15
Контрольні питання до розділу 2	27
3. Розрахунок втрат в сталі	29
Контрольні питання до розділу 3	35
4. Розрахунок параметрів схем заміщення.....	37
Контрольні питання до розділу 4	49
5. Вентиляційний розрахунок.....	51
Контрольні питання до розділу 5	56
6. Тепловий розрахунок	58
Контрольні питання до розділу 6	65
7. Механічний розрахунок	67
Контрольні питання до розділу 7	75
Список рекомендованої літератури	77

Вступ

Процес проектування електричних машин вимагає знання окремих розділів фізики, математики, електротехніки, теплотехніки, механіки та економіки. Окреслити на практиці коло цих знань можливо за допомогою розв'язання конкретних практичних задач, які наведені у посібнику.

Процес проектування - дуже складний, багатоваріантний і трудомісткий процес, який в останні роки полегшують за рахунок використання системи автоматичного проектування (САПР) з застосуванням комп'ютерної техніки.

Свідомий проектант повинен розуміти напрями змін окремих величин, щоб прискорити за допомогою САПР розрахунки, які виконуватимуть вимоги технічних умов, стандартів та потреб користувача.

У цьому зв'язку посібник складено з задач на окремі фрагменти розділів проектування обертових електричних машин, мета яких:

- закріпити знання теоретичного матеріалу лекцій;
- вміти розраховувати окремі фрагменти проектування та скласти цілісну картину послідовності розрахунків окремих розділів проекту;
- оцінити вплив конструктивних розмірів та окремих параметрів на кінцевий результат;
- ефективно використовувати програми САПР, розуміючи послідовність і суть розрахунків, а також напрям шляху до виконання поставлених вимог.

Посібник має сім розділів, які складаються з коротких теоретичних відомостей, тексту задач та питань самоконтролю знань.

Задачі посібника використовують на практичних заняттях та для вправ вдома. Для розв'язання задач необхідно ознайомитись з матеріалом лекцій по конкретному розділу, стислими теоретичними відомостями перед розділом, або використовувати рекомендовану літературу.

Крім типових задач у посібнику подані задачі, які вимагають від студента проявити ініціативу, винахідливість і нестандартне мислення.

1. Проектування якірних обмоток електричних машин

На попередній (початковій) стадії розрахунку електричних машин визначали основні її розміри (діаметр якоря D та розрахункова довжина L_δ), використовуючи загальну залежність для електромагнітної (або розрахункової) потужності:

$$S_{em} = k \cdot (D^2 \cdot L_\delta) \cdot (A \cdot B_\delta) \cdot n, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт, що характеризує тип електричної машини (змінного або постійного струмів);

n – частота обертання (синхронна для машин змінного струму і номінальна – для машин постійного струму);

A і B_δ – відповідно лінійне навантаження і індукція у повітряному проміжку, величинами яких задавались згідно рекомендаціям.

З (1.1) слідує, що реалізація під час проектування добутку $(A \cdot B_\delta)$, який прийнятий при визначенні основних розмірів, дозволить отримати необхідну електромагнітну та номінальну вихідну потужність.

Саме проектування обмоток електричних машин повинно забезпечити раніш прийняту величину лінійного навантаження A у добутку $(A \cdot B_\delta)$.

Проектування обмоток має наступну послідовність:

- вибір кількості зубців;
- визначення кількості провідників у пазу;
- уточнення електромагнітних навантажень;
- розрахунок розмірів пазів;
- вибір розмірів провідників обмоток та перевірка можливості їх розташування в пазах;
- креслення розгорнутої схеми обмоток.

Визначення кількості зубців (пазів) здійснюється через вибір зубцевих кроків від t_{1min} до t_{1max} , які рекомендують у залежності від довжини полюсної дуги τ [3]. Це дозволяє розрахувати можливі межі кількості зубців:

$$z_{1min} \dots z_{1max} = \pi \cdot D / (t_{1max} \dots t_{1min}). \quad (1.2)$$

Остаточний вибір кількості зубців z_1 повинен відповідати вимогам щодо виконання обмотки. Наприклад, для машин з $2p < 8$ число пазів на фазу і полюс повинно бути цілим, відповідати вимогам до безшумної роботи, нагріву, розподілу кривої МРС, витрат на виготовлення тощо.

Визначення кількості зубців дозволяє розрахувати реальний зубцевий крок:

$$t_1 = \pi \cdot D / z_1, \quad (1.3)$$

який є необхідним для визначення розмірів пазу.

Кількість провідників у пазах визначають виразом:

$$u_n = (\pi \cdot D \cdot A \cdot a) / (z_1 \cdot I_n) = (A \cdot t_1) / (i_a), \quad (1.4)$$

де i_a – струм паралельної вітки,

a – кількість паралельних віток; для машин постійного струму загальна кількість паралельних віток – $2a$.

Число u_n необхідно мати парним у двошарових обмотках, а у одношарових – парним або непарним.

Прийнята кількість u_n дозволяє для машин змінного струму знайти число послідовних витків у фазі:

$$w_1 = (u_n \cdot z_1) / (2 \cdot m \cdot a) \quad (1.5)$$

а також уточнити величину лінійного навантаження

$$A = (2 \cdot I_n \cdot w_1 \cdot m) / (\pi \cdot D) = (u_n \cdot i_a) / (t_1), \quad (1.6)$$

Це значення A не повинно відрізнятися від попередньо прийнятого значення більш, ніж на 5%.

Остаточна прийнята кількість w_1 дозволяє уточнити величину магнітного потоку.

$$\Phi = (k_E \cdot U_n) / (4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}), \quad (1.7)$$

а також індукцію у повітряному проміжку

$$B_\delta = \Phi / (\alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta) \quad (1.8)$$

Примітка. При дробовому значенні числа пазів на полюс і фазу у виразі коефіцієнта розподілу замість q треба використовувати чисельник неправильного дробу.

Наступним етапом проектування є визначення форми і розмірів пазів. Загально прийнято, що для машин постійного струму до 30кВт і машин змінного струму до 100кВт – використовують всипні обмотки (із круглого проводу), а пази – трапецеїдальні, овальні чи грушоподібні. Для більших потужностей використовують для обмоток прямокутний провід і пази відкриті (напіввідкриті).

Розміри пазів знаходять через визначення ширини зубця та висоту ярма, використовуючи залежності:

$$b_z = (B_\delta \cdot t_1) / (B_{z1} \cdot l_{нак} \cdot k_c), \quad (1.9)$$

та

$$h_a = \Phi / (2 \cdot B_a \cdot l_{нак} \cdot k_c), \quad (1.10)$$

де B_a – індукція у ярмі статора, як рекомендують [1, 2, 4].

Користуючись виразами (1.9) та (1.10) треба знати, що у всипних обмотках стінки зубців паралельні, а у жорстких та стержневих – паралельні стороні пазу.

Обмотки виконують з мідних провідників класу нагрівостійкості «В» (до 15кВт) та «F» для більших потужностей. Густина струму визначають, виходячи з теплового фактору ($A \cdot j$), який вибирають згідно рекомендаціям [3].

$$j = (A \cdot j) / A, \quad (1.11)$$

де A – уточнена величина лінійного навантаження.

Ефективний переріз витка дорівнює:

$$q_{эф} = I_n / (a \cdot j), \quad (1.12)$$

який може бути виконаний з n -ої кількості паралельних провідників з елементарним перерізом:

$$q_{ef} = n \cdot q_{el}. \quad (1.13)$$

Розміри провідників обмоток вибирають з стандартної таблиці (сортаменту) [3]. При цьому треба керуватись обмежувальними розмірами. Для всіпних обмоток діаметр круглого проводу не повинен бути більшим $(1,4 \dots 1,8) \text{ мм}$. Прямокутні провідники не повинні мати переріз більше $(18 \dots 20) \text{ мм}^2$, а найменший розмір повинен бути не більш $(2,5 \dots 3,0) \text{ мм}$. Бажано розміри прямокутного проводу вибирати з огляду на ширину пазу.

Важливим етапом є перевірка можливості розміщення провідників у пазу.

Для всіпних обмоток можливість розміщення перевіряють на коефіцієнті заповнення паза провідниками:

$$k_z = (n \cdot d_{iz}^2 \cdot u_n) / S'_n, \quad (1.14)$$

де S'_n – площа перерізу паза, яку займають тільки провідники.

Коефіцієнт k_z повинен бути не більш 0,7 при автоматичній намотці і не більш 0,75 – для ручної.

Перевірку і уточнення можливості розміщення прямокутних провідників визначають складанням специфікації паза [3, 4].

Після виконання попередніх вимог подають розгорнуту схему обмотки. Для машини змінного струму потужності до 15 кВт обмотки одношарові, в інших випадках – двошарові.

Задача 1.1.

Трифазний асинхронний двигун з коротко замкнутим ротором має дані, які наведені у табл. 1.1. Визначити кількість зубців на статорі, можливу кількість зубців на роторі і тип обмотки.

Таблиця 1.1

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність $P_n, \text{кВт}$	2,2	22,0	22,0	22,0	250,0	132
Напруга $U_n, \text{В}$	220/380	220/380	380/660	220/380	380/660	380/660
ККД, в.о.	0,83	0,885	0,90	0,885	0,925	0,93
$\cos \varphi$, в.о	0,87	0,91	0,88	0,84	0,9	0,9
Кількість полюсів, $2p$	2	2	6	8	2	4
Висота обертання $h, \text{мм}$	80	180	200	200	355	280

Задача 1.2.

Визначити кількість зубців статора трифазних синхронних машин, дані яких наведені у табл. 1.2. Перевірити можливість виконання обмотки.

Таблиця 1.2

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Габарит	6	8	10	12	13	14
Кількість полюсів, $2p$	4	6	8	10	12	16

Задача 1.3.

В асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором визначити кількість зубців на статорі і роторі, якщо відомі наступні дані: номінальна потужність $P_n = 55 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_n = 220/380 \text{ В}$, кількість пар полюсів $p = 5$, ККД $\eta = 0,919$, $\cos \varphi = 0,846$, висота осі обертання $h = 315 \text{ мм}$, ступінь захисту IP44.

Задача 1.4.

Розрахувати кількість зубців і кількість провідників у пазу трифазного асинхронного двигуна серії 4А, дані яких у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність $P_n, \text{ кВт}$	30	45	90	90	200	315
Номінальна фазна напруга $U_n, \text{ В}$	220	220	220	220	380	380
Лінійне навантаження $A, \text{ А/м}$	3,35x x104	4,11x x104	4,13x x104	4,07x x104	4,62x x104	4,39x x104
Кількість полюсів, $2p$	4	10	4	10	4	4
Діаметр розточки статора, $D, \text{ м}$	0,211	0,400	0,290	0,450	0,335	0,380
Кількість паралельних гілок, a	2	5	4	5	4	4
Висота осі обертання, $h, \text{ мм}$	180	280	250	355	315	355

Задача 1.5.

Визначити кількість провідників у пазу та кількість послідовних витків у фазі трифазного асинхронного двигуна, дані якого подані у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність $P_n, \text{ кВт}$	4,0	15	4,0	30	110	160
Номінальна напруга $U_n, \text{ В}$	220/380	380/660	220/380	220/380	220/380	380/660
Кількість полюсів, $2p$	2	2	4	4	2	6
ККД, в.о.	0,865	0,88	0,84	0,91	0,91	0,935
$\cos \varphi$, в.о	0,89	0,91	0,84	0,89	0,89	0,9
Лінійне навантаження $A, \text{ А/см}$	232	335	254	335	457	420
Діаметр розточки $D, \text{ м}$	0,095	0,155	0,105	0,211	0,275	0,425
Кількість зубців z_1	24	36	24	48	48	72
Кількість паралельних віток, a	1	1	1	2	2	3
Кількість елементарних провідників	1	2	1	4	4	2

Задача 1.6.

Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором потужністю $P_n = 132 \text{ кВт}$,

$2p=6$, $U_n=380/660B$ має діаметр розточки статора $D=0,425м$, зубцевий крок $t_1=18,54мм$, лінійне навантаження $A=5,14 \cdot 10^4 A/м$, номінальний струм $I_{нф}=142A$, кількість паралельних віток $a=3$. Визначити кількість провідників у пазу і кількість послідовних витків в фазі статора.

Задача 1.7.

Розрахувати розміри пазу статора всипної обмотки трьохфазної машини змінного струму, дані якої наведені у табл. 1.5. Дати ескіз.

Таблиця 1.5

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність $P_n, кВт$	11,0	110	11,0	200	160	160
Діаметр розточки $D_a / D, м$	0,225/ 0,130	0,520/ 0,275	0,225/ 0,145	0,520/ 0,335	0,520/ 0,370	0,590/ 0,440
Розрахункова довжина $l_\delta, м$	0,130	0,175	0,160	0,290	0,275	0,375
Кількість зубців на z_1	24	48	36	60	72	72
Кількість полюсів, $2p$	2	2	4	4	6	8

Задача 1.8.

Визначити розміри паза статора асинхронного двигуна з фазним ротором $P_n=155кВт$, $U_n=220В$, $f_1=50Гц$, $2p=4$, При проектуванні прийнята двошарова обмотка, що має два витки у жорсткій секції, кожен виток має дві паралельні гілки, розмір провідника паралельної гілки $3 \times 6,3мм$ (без ізоляції), $q_{ел}=18,35мм^2$.

При вкладанні провідників у паз і знаходженні розмірів паза врахувати: провід має марку ПСД, клас нагрівостійкості F, передбачити виткову ізоляцію, ізоляція пазу - гільзова, більша сторона провідника розташована паралельно стінкам паза, паз - напіввідкритий, кріплення обмотки клинами.

Задача 1.9.

Спеціальний асинхронний двигун має потужність $P_n=125кВт$, $U_n=6000В$, $\eta=0,9$, $\cos\varphi=0,9$, $n_{ном}=1460об/хв$, розрахункову довжину $l_\delta=525мм$, діаметр розточки $315мм$, зовнішній діаметр статора $600мм$, кількість зубців статора $z_1=48$, розміри прямокутного паза на світло $h_n \times b_n=65 \times 12,0мм$. Дати пропозиції щодо виконання обмотки статора: крок, кількість пазів на полюс та фазу, кількість провідників у пазу, кількість послідовних витків у пазу. Додаткові вимоги: кількість паралельних віток обмотки $a=1$; індукція в повітряному зазорі повинна бути $0,55 \div 0,70Тл$, густина струму $J=3...3,5А/мм^2$.

Задача 1.10.

Розрахувати розміри трапецієподібного паза для всипної обмотки асинхронного двигуна з наступними даними: потужність на валу двигуна $P_n=15кВт$, номінальна напруга $U_n=220/380В$, кількість пар полюсів $p=2$, індукція в повітряному проміжку $B_\delta=0,776Тл$, індукція в зубцях статора $B_{z1}=1,95Тл$, індукція у ярмі статора $B_a=1,65Тл$, магнітний потік $\Phi=9,01 \cdot 10^{-3}Вб$, зовнішній діаметр статора

$D_a = 272\text{мм}$, внутрішній діаметр статора $D = 185\text{мм}$, загальна довжина осердь статора і ротора $l_{cm1} = 130\text{мм}$, число пазів статора $z_1 = 48$, зубцевий крок статора $t_1 = 12,01 \cdot 10^{-3}\text{м}$, коефіцієнт заповнення сталі $k_c = 0,95$.

Задача 1.11.

Визначити розміри паза якоря генератора змішаного збудження потужністю $P_n = 150\text{кВт}$, $U_n = 230\text{В}$, $n_{ном} = 1450\text{об/хв}$. Із розрахунків обмотки відомо: обмотка двошарова, в одному реальному пазу три елементарних, кожна секція має $w_1 = 1$, виток має дві паралельні вітки. Розмір провідника паралельної вітки: $2,12 \times 7,1 = 14,69\text{мм}$ (без ізоляції). При визначенні розмірів паза вважати: паралельні вітки виконані з проводу марки ПСД, клас нагрівостійкості F, паз відкритий, більша сторона провідника розташована паралельно стінкам паза.

Задача 1.12.

Перевірити розміщення провідників всипної обмотки у пазу (рис. 1.1) машини малої потужності, якщо відомо: число провідників у пазу $u_n = 100$, $r_1 = 5,35\text{мм}$, $b_{i3} = 0,2\text{мм}$, $h_n = 23\text{мм}$, $h_{ш} = 0,6\text{мм}$, $n_{ел} = 1$, $a = 5,4\text{мм}$, $h = 2,1\text{мм}$, $r_2 = 3,98\text{мм}$, $h_1 = 12,6\text{мм}$, $d_{i3} = 1,14\text{мм}$.

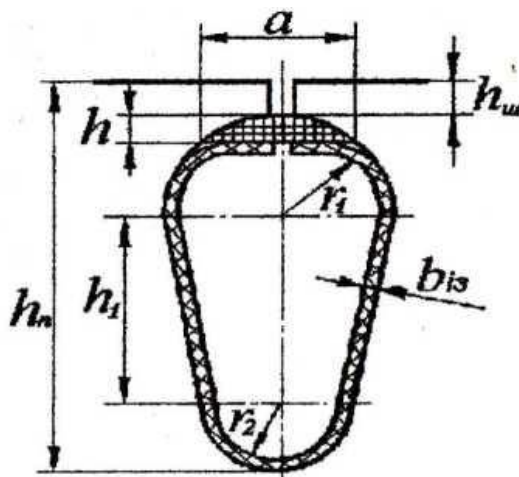


Рисунок 1.1.

Задача 1.13.

Трифазний асинхронний двигун з к.з. ротором загального призначення з ступенем захисту IP44 і одношаровою обмоткою має вихідні дані у табл. 1.6, визначити кількість зубців, провідників у пазу, послідовних витків у фазі та індукцію у повітряному проміжку.

Таблиця 1.6

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, $P_n, \text{кВт}$	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5
Номінальна напруга, $U_n, \text{В}$	220/ 380	220/ 380	220/ 380	220/ 380	380/ 660	380/ 660
ККД	0,81	0,8	0,82	0,82	0,85	0,86
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	0,81	0,8	0,82	0,82	0,85	0,86
Висота осі обертання, $h, \text{мм}$	80	90	100	112	132	160

Таблиця 1.6

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Кількість полюсів, $2p$	2	4	4	6	6	8
Лінійне навантаження, $A, A/м$	$1,94 \times 10^4$	$2,33 \times 10^4$	$2,46 \times 10^4$	$2,62 \times 10^4$	$2,56 \times 10^4$	$2,74 \times 10^4$
Діаметр розточки, $D, мм$	74	95	105	132	158	197
Розрахункова довжина, $L_\delta, мм$	71	100	100	125	115	145
Кількість паралельних віток, a	1	1	1	1	1	2
Обмотковий коефіцієнт, $k_{об1}$	0,958	0,96	0,96	0,96	0,96	0,966

Задача 1.14.

Перевірити можливість розміщення провідників двошарової обмотки з напівжорсткими секціями у пазу електричної машини змінного струму, ескіз якого є на рис. 1.2. Необхідні дані приведені у табл. 1.7.

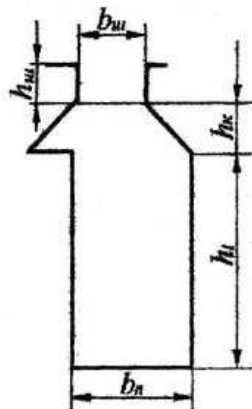


Рисунок 1.2.

Таблиця 1.7

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Кількість провідників у пазі, u_n	56	48	56	48	60	60
Розміри провідників, $a \times b, мм$	$1,16 \times 3,53$	$1,08 \times 4,1$	$1,08 \times 3,28$	$1,16 \times 4,1$	$1,00 \times 4,00$	$1,18 \times 4,25$
Ширина паза, $b_n, мм$	9,7	10,7	9,2	10,7	11,0	13,0
Ширина пазового відкриття (шліц), $b_{ш}, мм$	5,7	6,0	5,3	6,0	6,5	7,0
Висота паза під обмотку, $h_1, мм$	41,7	37	38,2	35	37,0	39
Сумарна висота клину та вусика паза, $h_k + h_{ш}, мм$	4	4,5	4	4,5	4,0	4,5

Задача 1.15.

При проектуванні конденсаторного асинхронного мікродвигуна потужністю $P_n = 40 Вт$, з номінальною напругою $U_n = 115 В$, частотою мережі $f_1 = 400 Гц$ і син-

хронною частотою обертання $n_1 = 12000 \text{ об/хв}$ отримано: $u_n = 100$ - кількість провідників у пазу, $d/d_{i3} = 0,59/0,66 \text{ мм}$ - розміри провідника голого та в ізоляції, марка провідника ПЕВ-2, обмотка одношарова. Перевірити можливість розміщення обмотки у пазу, ескіз якого даний на рис. 1.3. Розміри паза на світло: $h_n = 17 \text{ мм}$, $h_{ui} = 1 \text{ мм}$, $b_{ui} = 1,6 \text{ мм}$, $b = 3,2 \text{ мм}$, $b' = 7,6 \text{ мм}$, $R = b/2$, $R' = b'/2$, Прийняти припуск на збірку пакету статора $\Delta_{зб} = 0,15 \text{ мм}$, односторонню ізоляцію паза $\Delta_{i3} = 0,2 \text{ мм}$.

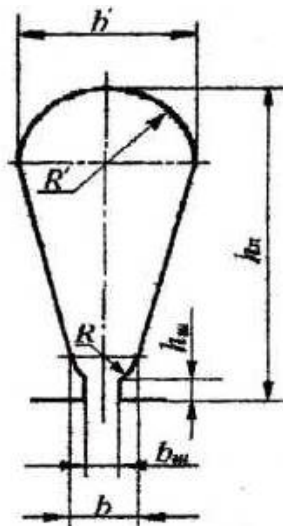


Рисунок 1.3.

Задача 1.16.

Перевірити розміщення всипної обмотки у пазу (рис. 1.4), дані якого наведені у табл. 1.8. Розміри паза вважати у штампі. Двосторонню товщину ізоляції паза прийняти $2\Delta_{i3} = 0,4 \text{ мм}$.

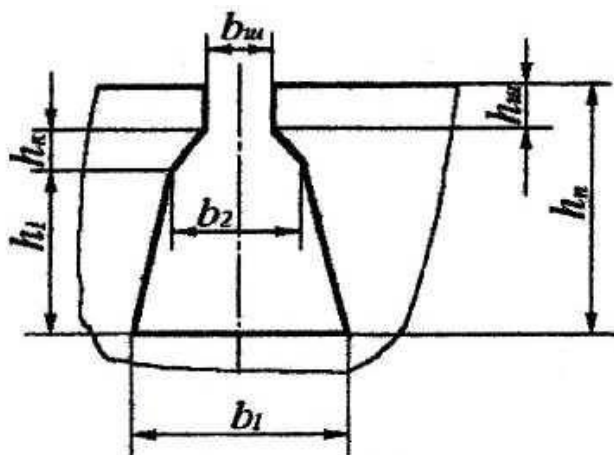


Рисунок 1.4.

Таблиця 1.8

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Діаметр елементарного ізольованого провідника, $d_{i3}, \text{мм}$	1,26	1,14	1,33	1,14	1,33	1,12
Кількість провідників у пазу, u_n	26	36	30	36	23	20
Кількість елементарних провідників, n	4	2	2	2	1	2

Таблиця 1.8

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Найбільша ширина паза, $b_1, \text{мм}$	14	8,6	10	7,7	5,8	6,8
Ширина паза під клином, $b_2, \text{мм}$	8,7	6,6	7,6	6,7	4,5	5,0
Висота паза, $h_1, \text{мм}$	24,5	23,25	18,3	23,0	15,6	16,2
Висота клину, $h_k, \text{мм}$	2	2	2	2	0,5	0,5
Ширина відкриття паза (шліца), $b_{ш}, \text{мм}$	4	3,7	3,7	3,7	3,0	3,5
Висота вусика (паза), $h_{ш}, \text{мм}$	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,9

Задача 1.17.

В асинхронному двигуні потужністю $P_n = 45 \text{ кВт}$, номінальною напругою $U_n = 220/380 \text{ В}$ і з висотою осі обертання 315 мм визначити можливість розміщення у пазу двошарової всипної обмотки і коефіцієнт заповнення паза міддю φ_{Cu} , якщо відомі: діаметр проводу $d/d_{iz} = 1,6/1,68 \text{ мм}$, число ефективних провідників $u_n = 16$, кількість елементарних провідників $n = 4$, товщина пазової ізоляції $b_{iz} = 0,55 \text{ мм}$. Ескіз пазу статора показано на рис. 1.5 (подані розміри паза у штампі).

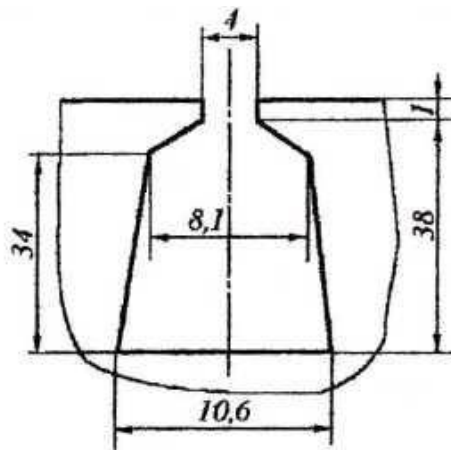


Рисунок 1.5.

Контрольні питання до розділу 1**1. Загальні теоретичні положення.**

- 1.1. Де розташована якірна (робоча) обмотка і які її особливості?
- 1.2. Написати вираз ЕРС для якоря машин змінного струму, пояснити величини, які до нього входять.
- 1.3. Написати вираз ЕРС якоря машин постійного струму, дати пояснення.
- 1.4. Що таке крок обмотки, і як він розраховується?
- 1.5. Перелічити складові обмоткового коефіцієнта і дати пояснення.
- 1.6. Вплив обмоткового коефіцієнта на розрахункову (електромагнітну) потужність.
- 1.7. Нерозрізні та розрізні обмотки якоря. Де вони використовуються?

2. Загальні відомості щодо обмоток.

- 2.1. Дати перелік типів обмоток якорів електричних машин постійного струму, вказати кількість паралельних віток.

- 2.2. Принцип побудови обмоток якорів (робочих) машин змінного струму.
- 2.3. Типи обмоток якорів (робочих) машин змінного струму. Обмотки поліпшеної технології виготовлення.
- 2.4. Одношарові обмотки, особливості (переваги та недоліки).
- 2.5. Двошарові обмотки, особливості (переваги та недоліки).
- 2.6. Обмотки з дрібною кількістю пазів на полюс і фазу, вказати особливості.
3. *Відомості, необхідні для проектування обмоток.*
 - 3.1. Загальні вимоги щодо обмоток електричної машини.
 - 3.2. Загальні вимоги до ізоляції обмоток.
 - 3.3. Класи нагрівостійкості ізоляції.
 - 3.4. Місця, де використовується ізоляція в обмотках.
 - 3.5. Конструктивні типи ізоляції.
 - 3.6. Марки проводів обмоток. Пошук необхідного перерізу проводів.
 - 3.7. Перевага і недоліки емальованих та прямокутних проводів.
4. *Конструктивні типи обмоток якорів (робочих).*
 - 4.1. Дати перелік конструктивних форм обмоток.
 - 4.2. Всипні обмотки.
 - 4.3. Жорсткі обмотки.
 - 4.4. Стрижневі обмотки.
 - 4.5. Короткозамкнені обмотки.
 - 4.6. Як перевірити можливість розміщення всипної обмотки в пазах?
 - 4.7. Як перевірити можливість розміщення жорстких обмоток в пазах?
5. *Процес проектування обмоток якоря.*
 - 5.1. Послідовність дій при проектуванні обмоток. Яка з величин електромагнітного навантаження реалізується при проектуванні обмотки?
 - 5.2. Послідовність при знаходженні кількості зубців, оцінка кінцевого вибору.
 - 5.3. Знаходження кількості провідників в пазу, та витків у фазі. Як уточнити і навіщо лінійне навантаження, індукцію в повітряному проміжку?
 - 5.4. Знаходження розмірів пазів та ярм якоря.
 - 5.5. Перевірка можливості розміщення провідників у пазах.
 - 5.6. Специфікація.
 - 5.7. Дії проектанта з метою нормального розміщення провідників обмотки в пазах.

2. Розрахунок магнітного кола

Метою розрахунку є визначення сумарної МРС вздовж магнітної силової лінії основного магнітного потоку для знаходження струму збудження у синхронної машини і машини постійного струму, а також струму намагнічування асинхронних машин. Ці струми створюють необхідні МРС й магнітний потік, що забезпечують у проєктованій машині необхідну електромагнітну (розрахункову) потужність.

Розрахунок магнітного кола базується на законі повного струму, який для електричних машин на пару полюсів має загальний вигляд

$$\sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_a + F_j + 2F_m \quad (2.1)$$

де F_{δ} - МРС повітряного проміжку (до речі, є найбільша за інших);

F_{z1} - МРС зубців статора;

F_{z2} - МРС зубців ротора;

F_a - МРС ярма статора;

F_j - МРС ярма ротора;

F_m - МРС полюса.

МРС кожної ділянки магнітного кола знаходять:

$$F_i = H_i \cdot L_i \quad (2.2)$$

де H_i - питома магнітна напруженість i -тої ділянки кола;

L_i - довжина магнітної силової лінії на i -тій ділянці кола з однаковими (або усередненими) магнітними властивостями.

Питома магнітна напруженість зв'язана з величиною магнітної проникливості

$$H_i = \frac{B_i}{\mu_i} \quad (2.3)$$

де B_i - індукція на i -тій ділянці кола;

μ_i - магнітна індукція на i -тій ділянці.

Для повітряних проміжків $\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ є величиною постійною. Магнітна напруженість сталевих ділянок кола залежить від величини індукції у них і є величиною змінною разом зі зміною величини індукції.

На практиці не використовують (2.3), а сразу по кривим намагнічування знаходять $H_i = f(B_i)$ для конкретного типу сталі.

МРС повітряного проміжку з індукцією B_{δ} дорівнює

$$F_{\delta} = H_{\delta} \cdot L_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \delta \cdot K_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta' \quad (2.4)$$

де $\delta' = \delta \cdot K_{\delta}$ - приведений ефективний повітряний проміжок з урахуванням величини шліців на статорі і роторі;

$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}$ - загальний коефіцієнт Картера, який є додатком коефіцієнтів Картера статора $K_{\delta 1}$ і ротора $K_{\delta 2}$.

МРС зубців визначають з урахуванням їх насичення. Зубець є величиною ін-

дукції у будь-якому перерізі менш $1,9Tл$ для холоднокатаної сталі або менш $1,8Tл$ для гарячекатаної сталі вважають ненасиченими. При збільшенні відповідних значень індукції зубець вважають насиченим у конкретних перерізах.

Взагалі зубці можуть мати наступні форми:

- з паралельними стінками і постійним перерізом по всій висоті (обмотки всіпні);
- трапецевидної і змінним перерізом по висоті зубця (обмотки з прямокутного проводу);
- зі змінним перерізом по висоті паза (наприклад, лопаточні).

Найбільш поширені ненасичені зубці. Для перерахованих вище форм пазів спочатку знаходять у прийнятих перерізах величини індукції.

Для зубців з постійним перерізом по висоті (трапеціїдальні, овальні, грушоподібні) достатньо знайти індукцію у будь-якому перерізі, бо по висоті паза вона однакова

$$B_z = B_\delta \cdot \frac{l_\delta \cdot t_{z1}}{l_{cm} \cdot b_z \cdot K_c} \quad (2.5)$$

де l_δ - розрахункова довжина магнітопроводу (це один з основних розмірів машини при проектуванні);

t_{z1} - зубцевий крок;

l_{cm} - довжина сталі магнітопроводу без урахування ізоляції між листами;

b_z - ширина зубця у місці постійного перерізу;

K_c - коефіцієнт, який враховує ізоляцію між листами сталі.

Перераховані величини у виразі (2.5) відомі після виконання проектування обмотки.

По визначеній B_z знаходять величину H_z і МРС зубця

$$F_z = H_z \cdot h_z \quad (2.6)$$

де h_z - висота зубця.

У випадку трапеціїдальної форми зубця необхідно знайти індукцію у трьох перерізах: на поверхні - B_{z1} , по середині зубця - B_{z2} , у ножці зубця - B_{z3} . По цим значенням, використовуючи криві намагнічування, знаходять відповідно $H_{z \max}$, $H_{z \text{ серед}}$ і $H_{z \min}$. Це дозволяє прийняти по формулі Сімпсона

$$H_z = \frac{H_{z \max} + 4H_{z \text{ серед}} + H_{z \min}}{6} \quad (2.7)$$

яку вважають постійною по всій висоті зубця.

Одночасно, необхідно вказати, що зміна напруженості по висоті пазу H_{zi} має складну залежність. Для спрощення розрахунків площину між осями і залежністю замінюють рівним по площині прямокутником з основою H_z . Це значення і дає формула Сімпсона.

Аналогічно за основу прямокутника приймають H_z при величині B_z індукції на $1/3$ висоти паза від найменшого перерізу - $B_{z1/3}$.

В обох випадках H_z приймають постійним і знаходять МРС зубця по формулі

(2.6).

Для визначення МРС зубців з різко змінним перерізом виконують:

- по висоті зубця виділяють ділянки, де різко змінюється переріз;
- на кожній ділянці знаходять зубцевий крок t_{zi} і ширину паза b_{zi} ;
- використовуючи формулу (2.5), для кожної ділянки знаходять індукцію B_{zi} ;
- по величині B_{zi} знаходять H_{zi} для кожного перерізу;
- будують криву $h_z = f(H_{zi})$, де H_{zi} – відомі;
- площину фігури між осями і кривою $h_z = f(H_{zi})$ заміняють прямокутником рівної площини з основою H_z ;
- далі по формулі (2.6) знаходять F_z , використовуючи H_z .

У разі насичення у одному з перерізів зубця вказаних форм індукція більш 1,9Тл (для холоднокатаних сталей) або 1,8Тл (для гарячекатаних сталей) необхідно враховувати відхилення магнітного потоку у паз, зменшення реальної індукції у перерізі, де має місце насичення, і питомої напруженості.

З урахуванням відхилення потоку у паз сумарна індукція у перерізі i має вигляд

$$B'_{zi} = B_{zi} + \mu_0 \cdot H_{zi} \cdot K_{ii} \quad (2.8)$$

де B_{zi} - реальна індукція у i -ому перерізі зубця;

$\mu_0 \cdot H_{zi} \cdot K_{ii}$ - реальна індукція у i -ому перерізі паза;

$K_{ii} = \frac{S_{ii}}{S_{zi}}$ - відношення площ паза до зубця.

Для використання формули (2.6) виконують наступну послідовність дій:

- розбивають по висоті зубців на ділянки і нумерують їх;
- для кожного перерізу ділянки знаходять індукцію B_{zi} ;
- якщо у деяких ділянках немає насичення, то для них знаходять по кривим намагнічування для зубців питому напруженість (аналогічно як для ненасичених зубців);
- у тих перерізах, де має місце насичення, використовують насичене значення індукції B'_{zi} , але питому напруженість знаходять по спеціальним кривим намагнічування з урахуванням величини коефіцієнта

$$K_{ii} = \frac{b_{ii} \cdot l_{\delta}}{b_{zi} \cdot l_{\delta} \cdot K_c} \quad (2.9)$$

- далі будують залежність $h_i = f(H_{ii})$;
- площу між осями і кривою $h_i = f(H_{ii})$ заміняють рівним по площі прямокутником, основа якого H_n і є середнім значенням, яке використовується у формулі (2.6).

Вибір того чи іншого способу розрахунку F_z залежить від конкретної форми паза і величини індукції у перерізах зубців.

При розрахунку МРС ярем виділяють два випадки:

- ярма прилягають до явно виражених полюсів (яро ротора синхронних машин і статора машин постійного струму), де вважають магнітний потік (і індукцію) у будь-якому перерізі ярма однаковим;
- ярма прилягають до неявно виражених полюсів (яро статорів асинхронних і

синхронних машин, а також якоря машин постійного струму).

Індукція у ярмах біля явно виражених полюсів

$$B_a = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2 \cdot h_a \cdot l_a} = \frac{\Phi \cdot (1 + \sigma)}{2 \cdot h_a \cdot l_a} \quad (2.10)$$

де Φ - основний потік;

Φ_σ - потік розсіювання;

h_a - висота ярма;

l_a - довжина ярма (не шихтована).

По величині B_a і відповідним кривим намагнічування знаходять питому напруженість H_a і МРС

$$F_a = H_a \cdot L_{\text{ярем}} \quad (2.11)$$

де $L_{\text{ярем}}$ - середня довжина магнітної силової лінії у ярмі (відповідна довжина полюсної дуги ярма).

Якщо ярма безпосередньо розташовані поруч із зубцевою зоною, то у цьому випадку розподіл індукції по довжині і висоті полюсної дуги нерівномірний. У цьому випадку знаходять найбільшу індукцію у перерізі ярма

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a \cdot L_{cm} \cdot K_c} \quad (2.12)$$

а питому напруженість H_a і МРС знаходять по:

- спеціальній кривій намагнічування для конкретної сталі, тоді МРС ярма знаходять по (2.11);

- по загальній кривій намагнічування H'_a , а МРС розраховують як

$$F_a = \xi \cdot H'_a \cdot L_a \quad (2.13)$$

де коефіцієнт ξ враховує нерівномірність розподілу індукції по середній дузі полюсного поділу ярма з залежності $\xi = f(B_a)$ [3, 4].

Особливістю розрахунку МРС полюсів є необхідність враховувати, крім основного, ще й потік розсіювання

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{b_m \cdot l_m \cdot K_c} = \frac{\Phi \cdot (1 + \sigma)}{b_m \cdot l_m \cdot K_c} \quad (2.14)$$

де $\sigma = 0,15 \dots 0,25$ - коефіцієнт, який враховує потік розсіювання;

$b_m \cdot l_m$ - довжина і ширина шихтованого полюса.

Після знаходження сумарної МРС на пару полюсів визначають:

струм намагнічування в асинхронних машинах

$$I_\mu = \frac{p \cdot \sum F}{0,9m \cdot W_1 \cdot K_{об1}} \quad (2.15)$$

струм збудження або кількість витків на пару полюсів, використовуючи залежність

$$\sum F = W \cdot I_{\text{ел}} \quad (2.16)$$

Треба відзначити, що для розрахунку експлуатаційних характеристик у синхронних машинах і машинах постійного струму будують характеристику неробочого ходу (або намагнічування) E_1 (або Φ) = $f(\sum F)$ або $f(I_{\text{зо}})$. З цією метою, задаючись значенням ЕРС (або Φ) 0,5; 0,75; 1,0 та 1,1, розрахунки МРС для кожного значення ЕРС роблять за послідовністю яка наведена вище. Далі будують характеристику $E_1 = f(\sum F)$.

Задача 2.1.

Визначити МРС повітряного проміжку на пару полюсів асинхронних двигунів, дані яких наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип	4A112 МАУЗ	4A160 56УЗ	4A225 М8УЗ	4A315 М4УЗ	4АН250 М4УЗ	4АН315 S10УЗ
Номінальна потужність $P_n, кВт$	3,0	11,0	30	200	110	75
Номінальна напруга $U_n, В$	220/380	220/380	220/380	380/660	220/380	380/660
Діаметр розточки статора $D, мм$	132	197	284	335	290	450
Повітряний проміжок $\delta, мм$	0,3	0,45	0,6	0,9	1,0	0,8
Кількість зубців: на статорі z_1 на роторі z_2	54 51	54 50	72 56	60 50	60 50	90 106
Пазовий шліц: - на статорі $b_{ш1}, мм$ - на роторі $b_{ш2}, мм$	3,0 1,5	3,7 1,5	3,7 1,5	5,7 -	3,7 1,5	4,0 -
Індукція в повітряному проміжку $B_\delta, Тл$	0,89	0,75	0,87	0,79	0,83	0,72

Задача 2.2.

Розрахувати МРС повітряного проміжку явнополюсного синхронного двигуна, дані якого наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, $P_n, кВт$	500	630	950	2000	4000	22000
Номінальна напруга, $U_n, В$	6000	6000	6000	6000	6000	10000
Число пар полюсів, p	6	2	8	8	8	8
Індукція в повітряному проміжку, $B_\delta, Тл$	0,86	0,79	0,73	0,88	0,877	0,57
Повітряний проміжок, $\delta \times 10^{-3}, м$	0,26	0,43	0,29	0,36	0,352	0,66
Проміжок під краями полюсу, $\delta_{\text{max}} \times 10^{-3}, м$	4	3,45	4,2	5,12	5,4	9,9
Зубцевий поділ статора, $t_1, м$	0,0314	0,0314	0,045	0,0509	0,05	0,9051

Таблиця 2.2

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Зубцевий поділ ротора, t_2 , м	0,026	0,026	0,034	0,041	0,044	0,044
Ширина пазу статора, $b_{п1}$, м	0,0125	0,0125	0,0172	0,0154	0,0186	0,018
Шліц пазу ротора, $b_{ш2} \times 10^{-3}$, м	4	4	4	4	4	4

Задача 2.3.

Знайти МРС повітряного проміжку на пару полюсів синхронної машини потужністю $P_n=500$ кВт з напругою $U_n=6000$ В та частотою обертання $n_n=500$ об/хв., якщо відомо: $\Phi_\delta=45,4 \cdot 10^{-3}$ Вб - потік в повітряному проміжку, $\alpha_\delta=0,66$ - коефіцієнт полюсного перекриття, $\tau=0,236$ - полюсний поділ, $K_{\delta1}=1,255$ - коефіцієнт Картера статора, $K_{\delta2}=1,075$ - коефіцієнт Картера ротора, $\delta=0,27 \cdot 10^{-2}$ м - величина повітряного проміжку, $L_\delta=0,36$ м - розрахункова довжина статора.

Задача 2.4.

Знайти МРС повітряного проміжку турбогенератора потужністю 30000 кВт із номінальною напругою $U_n=10500$ В, якщо відомі додатково: діаметр розточки статора $D=0,895$ м, розрахункова довжина $L_\delta=0,36$ м; величина повітряного проміжку $\delta=0,033$ м, коефіцієнти Картера з урахуванням зубцевості статора $K_{\delta1}=1,16$ і зубцевості ротора $K_{\delta2}=1,14$, коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_\delta=0,63$, кількість полюсів $2p=2$, магнітний потік повітряного проміжку $\Phi_\delta=1,7$ Вб. Розрахунок вести на пару полюсів.

Задача 2.5.

Знайти МРС повітряного проміжку явнополюсного синхронного двигуна потужністю 2000 кВт з номінальною напругою $U_n=6000$ В. Додатково відомо: число пар полюсів $p=8$, індукція в повітряному проміжку $B_\delta=0,88$ Тл, коефіцієнти Картера для статора $K_{\delta1}=1,20$ і для ротора $K_{\delta2}=1,22$, середнє значення повітряного проміжку $\delta=0,0041$ м. Розрахунок вести на пару полюсів.

Задача 2.6.

Знайти МРС повітряного проміжку турбогенератора потужністю 30000 кВт, що має наступні дані: діаметр розточки статора $D_1=0,975$ м, діаметр ротора $D_2=0,809$ м, кількість зубців на статорі $Z_1=54$ і на роторі $Z_2=32$, ширина прямокутних відкритих пазів статора $b_{п1}=0,0279$ м і ротора $b_{п2}=0,0355$ м, індукція в повітряному проміжку $B_\delta=0,8$ Тл.

Задача 2.7.

Визначити МРС повітряного проміжку на пару полюсів двигуна постійного струму потужністю 2 кВт, з напругою $U_n=220$ В і частотою обертання $n_n=1500$ об/хв., що має наступні дані: ЕРС якоря при номінальному навантаженні $E_a=208$ В, число пар полюсів $p=2$, кількість провідників якоря $N=522$, розрахункова довжина якоря $L_\delta=0,157$ м, ширина полюсного наконечника $b_p=0,078$ м, величина повітряного проміжку під полюсом $\delta=0,015$ м, коефіцієнт Картера, $K_\delta=1,21$, обмотка якоря - хвильова.

Задача 2.8.

В двигуні постійного струму з номінальною потужністю $P_n=5,5$ кВт, з номінальною напругою $U_n=220$ В і частотою обертання $n_n=1500$ об/хв. відомі: індукція в повітряному проміжку $B_\delta=0,64$ Тл, величина повітряного проміжку під полюсом

$\delta=1,6$ мм, шліц паза якоря $b_{\text{ш}}=2,8$ мм, зубцевий крок $t_1=17,32$ мм. Знайти МРС повітряного проміжку.

Задача 2.9.

Визначити МРС зубців статора і ротора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що має: номінальну потужність $P_n=15$ кВт; номінальну напругу $U_n=220/380$ В; номінальну частоту обертання $n_n=1450$ об/хв.; індукцію в повітряному проміжку $B_\delta=0,749$ Тл; діаметр розточки статора $D=0,185$ м; величину повітряного проміжку $\delta=5 \cdot 10^{-4}$ м; довжину осердя статора і ротора $L_1=L_2=L_\delta=0,13$ м; кількість зубців на статорі $Z_1=48$ і на роторі $Z_2=38$. Зубці статора і ротора мають постійний переріз, ширина зубців $b_{z1}=4,8 \cdot 10^{-3}$ м і $b_{z2}=6,5 \cdot 10^{-3}$ м, висота пазів $h_{n1}=0,0218$ м і $h_{n2}=0,032$ м. Магнітопровід виконаний із сталі 2013, коефіцієнт заповнення пакетів сталлю прийняти $K_c=0,97$.

Задача 2.10.

Розрахувати МРС зубцевої зони статора синхронного двигуна, дані якого приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, P_n , кВт	500	630	950	2000	4000	22000
Номінальна напруга U_n , В	6000	6000	6000	6000	6000	10000
Число пар полюсів, p	6	2	8	8	8	8
Індукція в повітряному проміжку, B_δ , Тл	0,86	0,79	0,73	0,88	0,877	0,57
Внутрішній діаметр статора, D , м	0,9	0,48	1,38	1,75	2,1	2,73
Число зубців статора, Z_1	90	48	96	108	132	168
Довжина статора, l_1 , м	0,342	0,477	0,317	0,370	0,528	1,5
Довжина пакетів осердя (сумарна), l_n , м	0,292	0,426	0,300	0,310	0,480	1,32
Ширина паза статора, b_n , м	0,0125	0,0125	0,0177	0,0154	0,0186	0,018
Висота паза статора, h_n , м	0,074	0,0429	0,111	0,104	0,124	0,09
Коефіцієнт заповнення пакета сталлю, K_c	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93

Задача 2.11.

Визначити МРС зубцевої зони ротора трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором потужністю 140 кВт, номінальною напругою $U_n=380/600$ В. Двигун має: індукцію в повітряному проміжку $B_\delta=0,9$ Тл; розрахункову довжину $L_\delta=0,2$ м; діаметр ротора $D_2=0,438$ м; кількість зубців на роторі $Z_2=81$; коефіцієнт заповнення пакетів сталлю $K_c=0,95$. Розміри зубця і паза ротора дані на рис. 2.1 і дорівнюють:

$$\begin{aligned} h_{z2} &= 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}; h_1 = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ h_2 &= 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ b_1 &= 1,55 \cdot 10^{-2} \text{ м}; b_2 = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ b_3 &= 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ b_{п2} &= 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}; b_{ш2} &= 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned}$$

Марка сталі осердя ротора 2312. При розрахунках врахувати відокремлення магнітного потоку в паз.

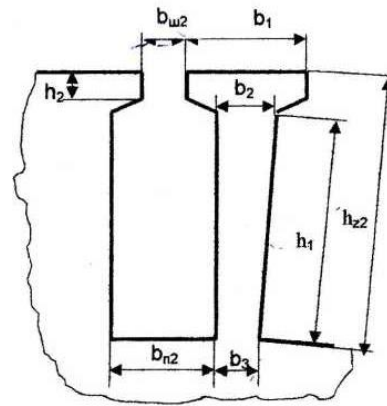


Рисунок 2.1

Задача 2.12.

Знайти МРС зубців статора синхронної машини потужністю 500 кВт. Пакет статора виготовлений з електротехнічної сталі марки 2013. Сталь ненасичена. Зубець має вид трапеції, паз - прямокутний. Висота пазу $h_n = 74$ мм, максимальна ширина зубця 20 мм, мінімальна ширина зубця 15,6 мм, розрахункова довжина $L_\delta = 242$ мм, індукція в повітряному проміжку $B_\delta = 0,846$ Тл, довжина пакетів статора $L_n = 230$ мм, коефіцієнт заповнення сталлю $K_c = 0,93$, ширина зубця на $1/3$ висоти паза – $b_{z1}/3 = 16,8$ мм, $t_1 = 0,0332$. Сталь зубців - 2013.

Задача 2.13.

Знайти МРС зубців статора турбогенератора потужністю 31250 кВт·А, який має ЕРС $E_a = 7350$ В, коефіцієнт форми поля $K_B = 1,11$, кількість витків у фазі $W_1 = 16$, обмотковий коефіцієнт $K_{об} = 0,92$, полюсний поділ $\tau = 1,54$ м, розрахункову довжину статора $L_\delta = 2,46$ м, довжина пакетів статора $L_n = 2,3$ м, коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_\delta = 0,65$, коефіцієнт заповнення сталлю пакетів статора $K_c = 0,93$, висота пазу статора $h_{n1} = 0,146$ м, зубцевий поділ $t_1 = 0,0642$, ширина зубця статора на поверхні розточки - $b_{z1} = 0,033$ м, на половині висоти зубця $b_{z2} = 0,0426$ м, на висоті зубця від поверхні розточки - $b_{z3} = 0,05224$ м, на висоті $1/3$ зубця від поверхні розточки - $b_{z1}/3 = 0,0394$ м, марка сталі статора 2411. Порівняти МРС зубців статора знайдену за формулою Сімпсона і по величині індукції на $1/3$ висоти пазу від поверхні розточки.

Задача 2.14.

Визначити МРС зубців ротора трифазного асинхронного двигуна серії 4А, якщо відомо: номінальну потужність, $P_n = 200$ кВт; номінальну напругу $U_n = 380/660$ В; кількість полюсів $2p = 4$; зовнішній діаметр ротора $D_2 = 0,272$ м; кількість зубців на роторі $Z_2 = 38$; розрахункову довжину $L_\delta = L_2 = 0,23$ м, коефіцієнт заповнення сталлю статора $K_c = 0,95$; індукція в повітряному проміжку $B_\delta = 0,83$ Тл. Паз ротора - лопатковий, розміри зубцевої зони дані на рис. 2.2.


$$\begin{aligned} D_2 &= 272 \text{ mm}, \\ h_{III} &= 1,0 \text{ mm}, \\ h_B &= 15 \text{ mm}, \\ h_{IH} &= 16,9 \text{ mm}, \\ h_{II} &= 40,8 \text{ mm}, \\ b_B &= 5 \text{ mm}, \\ b_{IH} &= 9,3 \text{ mm}, \\ b_{2H} &= 6,5 \text{ mm}; \\ b_{ZH} &= b'_{ZH} = b''_{ZH} = 9,8 \text{ mm}; \\ b_{Zbmin} &= 14,9 \text{ mm}; \\ b_{III} &= 1,5 \text{ mm}; \\ b_{Zbmax} &= 17 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Визначити МРС ярма (станини) машини постійного струму, якщо відомо: потужність машини дорівнює $P_2=32$ кВт, частота обертання $n_H=600$ об/хв., число полюсів $2p=4$, основний магнітний потік $\Phi_\delta=0,0243$ Вб, товщина станини $h_j=0,04$ м, довжина станини $L_j=0,3$ м, зовнішній діаметр станини $D_a=0,613$ м, матеріал станини - сталь Ст 3.

Двигун постійного струму для прокатного стану має номінальну потужність $P_n=4560$ кВт, номінальну частоту обертання $n_n=70$ об/хв, збудження незалежне від напруги збудження $U_{36}=110$ В, число полюсів $2p=24$. Визначити МРС ярма якоря, якщо відомо: магнітний потік під полюсом $\Phi_o=0,8$ Вб, зовнішній діаметр якоря $D_{\text{я}}=2,5$ м, внутрішній діаметр заліза якоря $D_o=2,0$ м, повна довжина якоря $L_{\text{я}}=1,5$ м, кількість радіальних каналів у якорі $N_k=20$, ширина радіального каналу $b_k=0,01$ м, висота паза якоря $h_n=0,06$ м. Магнітопровід якоря виконаний із електротехнічної сталі 1212, товщиною $\Delta=0,005$ м з коефіцієнтом заповнення 0,93.

Розрахувати МРС ярма статора для асинхронного двигуна серії 4А із ступенем захисту IP44, дані якого приведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип	4A132 M2Y3	4A355 M10Y3	4A355 M4Y3	4A200 M2Y3	4АН280 M4Y3	4АН280 510Y3
Номинальна потужність P_2 , кВт	11,0	110	250	45	132	45
Номинальна напруга, U_n , В	220/ 380	220/ 380	380/ 660	380/ 660	380/ 660	220/ 380
Відношення $E_1/U_{1n} = K_e$	0,98	0,972	0,986	0,97	0,986	0,96
Коефіцієнт форми поля, K_b	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Частота мережі, f_1 Гц	50	50	50	50	50	50
Зовнішній діаметр осердя статора, D_a , мм	225	590	590	345	530	520
Число полюсів, $2p$	2	10	4	2	4	10
Висота ярма статора, h_a , мм	30,1	27,7	59	35	45	21,6

Таблиця 2.4

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Довжина сталі осердя статора, $l_{ст}$, мм	130	355	360	160	240	200
Число витків фази статора, W_1	84	42	35	84	60	90
Обмотковий коефіцієнт, $K_{об1}$	0,958	0,945	0,874	0,92	0,874	0,92
Коефіцієнт заповнення сталі, K_c	0,95	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95

Задача 2.18.

Знайти МРС ярма індуктора двигуна постійного струму потужністю 75 кВт, що має наступні дані: зовнішній діаметр $D_a=0,310$ м, висоту ярма (станини) $h_c=0,016$ м, довжину станини $L_c=0,22$ м, кількість полюсів $2p=4$ і магнітний потік в повітряному проміжку під полюсом $\Phi_0=0,8 \cdot 10^{-2}$ Вб. Матеріал станини сталь Ст 3.

Задача 2.19.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю 15кВт, з номінальною напругою $U_n=220/380$ В і кількістю полюсів $2p=6$ має діаметр розточки $D=0,425$ м, повітряний проміжок $\delta=9 \cdot 10^{-4}$ м, висоту паза ротора $h_n=0,0414$ м, діаметр валу у місці посадки пакета ротора $d_b=0,14$ м. Визначити МРС ярма ротора, якщо індукція у ньому $B_{j2}=1,2$ Тл.

Задача 2.20.

Асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором з номінальною потужністю $P_n=7,5$ кВт, з номінальною напругою $U_n=220/380$ В, кількістю полюсів $2p=4$ має: зовнішній діаметр пакета магнітопроводу статора $D_a=0,233$ м, висоту ярма статора $h_a=0,0214$ м. Визначити МРС ярма статора, якщо індукція у ньому $B_a=1,6$ Тл, марка сталі 2013.

Задача 2.21.

Знайти МРС ярма ротора явнополюсного синхронного генератора з наступними даними: номінальна потужність $S_n=30$ кВт·А, діаметр валу ротора $d=72$ мм, довжина осердя ротора $L_2=170$ мм, висота ярма ротора $h_j=13$ мм, коефіцієнт заповнення осердя сталлю $K_c=0,97$, коефіцієнт розсіювання магнітного потоку $\sigma=1,043$, основний магнітний потік $\Phi_0=17,5 \cdot 10^{-3}$ Вб, кількість полюсів $2p=4$.

Задача 2.22.

Розрахувати МРС ярем синхронного двигуна, дані якого приведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, P_n кВт	500	630	950	2000	4000	22000
Номінальна напруга, U_n , В	6000	6000	6000	6000	6000	10000
Число пар полюсів, p	6	2	8	8	8	8
Потік біля основи полюсу, Φ_m , Вб	0,054	0,092	0,044	0,085	0,132	0,480
Внутрішній діаметр статора, D , м	0,9	0,48	1,38	1,75	2,1	2,73
Повітряний проміжок, δ , м	0,26	0,43	0,29	0,36	0,352	0,66
Висота паза статора, $h_{п1}$, м	0,074	0,0429	0,111	0,103	0,124	0,09
Товщина ободу, h_i , м	0,045	0,078	0,0468	0,075	0,094	0,126

Таблиця 2.5

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Довжина ярма ротора, l_j , м	0,47	0,541	0,446	0,500	0,68	1,76
Висота полюсного осердя, h_m , м	0,146	0,137	0,150	0,159	0,165	0,175
Висота полюсного наконечника, h_p , м	0,031	0,046	0,036	0,043	0,051	0,175
Коефіцієнт заповнення пакета сталлю, K_c	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93

Задача 2.23.

Визначити МРС ярем статора та ротора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що має: номінальну потужність $P_n=15$ кВт, з номінальною напругою $U_n=220/380$ В і кількістю полюсів $2p=4$, індукцію у ярмі статора $B_a=1,3$ Тл і у ярмі ротора $B_j=1,1$ Тл, зовнішній діаметр осердя статора $D_a=0,272$ м, діаметр осердя ротора $D_2=0,184$ м, діаметр валу у місті посадки ротора $d_b=0,06$ м, висота паза ротора $h_{п2}=0,032$ м. Магнітопровід виконано із сталі марки 2013.

Задача 2.24.

Синхронний генератор типу СГД потужністю $P_n=3500$ кВт, з номінальною напругою $U_n=6000$ В і частотою обертання $n_n=1000$ об/хв. має наступну геометрію полюса (рис. 2.3): $h_m=0,214$ м, $b_{cp}=0,125$ м, $h_b=0,03$ м, $a=0,125$ м, $h_j=0,199$ м, $b_m=0,253$ м, $L_n=0,9$ м - довжина полюса. Величина магнітного потоку у повітряному проміжку $\Phi_8=0,33$ Вб. Визначити МРС полюсу з урахуванням потоків розсіювання обмотки збудження.

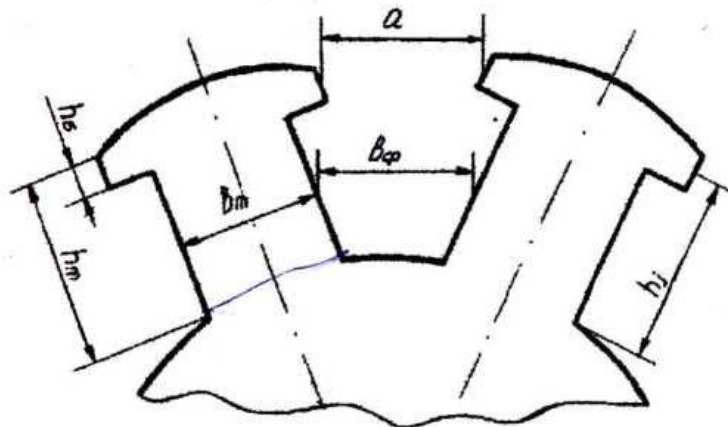


Рисунок 2.3

Задача 2.25.

В двигуні постійного струму визначити МРС осердя головного полюсу, якщо відомі: номінальна потужність $P_n=7,5$ кВт, номінальна напруга $U_n=220$ В, номінальна частота обертання $n_n=1500$ об/хв, кількість полюсів $2p=4$, діаметр якоря $D_a=0,156$ м, число паралельних віток $2a=2$, число ефективних провідників $N=522$, довжина осердя $L_o=157 \cdot 10^{-3}$ м, висота головного полюсу $h_m=57 \cdot 10^{-3}$ м, ширина осердя головного полюсу $b_m=62 \cdot 10^{-3}$ м, коефіцієнт заповнення сталлю $K_c=0,95$, коефіцієнт магнітного розсіювання головних полюсів $\sigma_p=1,15$, відношення $E_a/U_n=0,95$, осердя головних полюсів виконаний із сталі марки 3411.

Задача 2.26.

Двигун постійного струму з висотою осі обертання 160 мм має потужність $P_n=7,5$ кВт, номінальну напругу $U_n=220$ В, число зубців якоря $Z=29$, число пар по-

люсів $p=4$, індукцію в повітряному проміжку $B_\delta=0,652$ Тл, коефіцієнт розсіювання осердя полюсів $\sigma=1,15$, довжину осердя полюса $L_m=157 \cdot 10^{-3}$ м, ширину осердя полюсу $b_m=62 \cdot 10^{-3}$ м, висоту полюсу $h_m=57 \cdot 10^{-3}$ м. Знайти МРС полюсів машини, виготовленої із сталі 2013.

Задача 2.27.

Синхронний явнополюсний двигун номінальною потужністю $P_n=13$ кВт, номінальною напругою $U_n=220/380$ В і частотою обертання $n_n=1500$ об/хв має: діаметр розточки $D=0,156$ м, повітряний проміжок $\delta=0,0006$ м, довжину полюсу $L_m=0,103$ м, ширину полюсу $b_m=0,05$ м, висоту полюсу $h_m=0,05$ м. Визначити МРС полюсу, якщо відомий магнітний потік в повітряному проміжку - $\Phi_0=0,8 \cdot 10^{-2}$ Вб. Полюс виготовлений із сталі Ст 3 товщиною 0,001 м.

Задача 2.28.

Розрахувати МРС полюсу синхронного двигуна, дані якого приведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, P_n кВт	500	630	950	2000	4000	22000
Номінальна напруга, U_n , В	6000	6000	6000	6000	6000	10000
Число пар полюсів, p	6	2	8	8	8	8
Магнітний потік у перерізі полюсу біля його основи, Φ_m , Вб	0,054	0,110	0,05	0,085	0,145	0,73
Висота полюсного осердя, h_n , м	0,146	0,137	0,150	0,159	0,165	0,175
Висота полюсного наконечника, h_p , м	0,031	0,046	0,036	0,043	0,051	0,175
Ширина полюсу, b_m	0,102	0,138	0,116	0,151	0,185	0,222
Довжина осердя полюсу, l_m , м	0,35	0,496	0,326	0,39	0,56	1,63
Товщина стискуючої щоби полюсу, l_1 , м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
K_{oc}	1	1	1	1	1	1
$\lambda_p/\lambda_{m\sigma}$	-	-	-	2,4	3	3,2

Задача 2.29.

Розрахувати в абсолютних та у відносних одиницях струм намагнічування трифазного асинхронного двигуна серії 4А із ступенем захисту IP23, дані якого приведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_n , кВт	315	90	250	45	132	45
Номінальна фазна напруга, U_n , В	380	220	220	220	220	380
Число полюсів, $2p$	4	12	10	10	4	4
Висота осі обертання, h , мм	355	315	280	315	180	315
Номінальний ККД, η	0,945	0,915	0,9	0,915	0,9	0,94
Номінальний коефіцієнт потужності, $\cos\varphi_n$	0,91	0,77	0,812	0,82	0,84	0,89

Таблиця 2.7

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Кількість витків фази обмотки статора, W_1	40	50	90	60	76	50
Обмотковий коефіцієнт, K_{o61}	0,874	0,915	0,92	0,91	0,92	0,91
Відношення $K_e = E_1 / U_{1H}$	0,96	0,942	0,96	0,96	0,97	0,96
Розрахункова довжина, l_δ , м	0,235	0,309	0,2	0,27	0,159	0,21
Довжина осердя: статора, l_1 , м ротора, l_2 , м	0,235 0,24	0,309 0,314	0,2 0,205	0,27 0,275	0,159 0,164	0,21 0,215
Повітряний проміжок, δ , мм	1,2	0,7	0,7	0,8	0,6	1
Діаметр осердя статора: розточки, D , м зовнішній, D_a , м	0,235 0,24	0,309 0,314	0,2 0,205	0,27 0,275	0,159 0,164	0,21 0,215
Коефіцієнт Картера, K_δ	1,15	1,296	1,18	1,15	1,17	1,196
Внутрішній діаметр осердя ротора, D_i м	0,15	0,136	0,12	0,136	0,072	0,087
Кількість зубців: статора, Z_1 ротора, Z_2	60 50	90 106	90 106	90 106	48 38	60 50
Вид пазу статора	Прямокутний, напіввідкритий					
Розміри пазу статора: висота, $h_{п2}$, мм ширина, $b_{п1}$, мм	43,1 10,7	33,04 8,64	38,4 14,15	45,5 9,12	23,3 9,8	45,5 9,7
Вид пазу ротора	Трапецієвидний					
Розміри зубця ротора: висота, h_{z2} , мм мін. ширина, b_{z2min} , мм макс. ширина, b_{z2max} , мм	51 11,4 21,8	38,84 6,266 9,567	36,2 5,3 7,6	36,5 5,9 8,7	41,45 5,76 7,6	40 10,2 14,1
Марка сталі пакетів ротора і статора	2013	2312	2212	2312	2212	2312
Коефіцієнт заповнення пакета сталлю: -статора - ротора	0,95 0,97	0,95 0,97	0,95 0,97	0,95 0,97	0,95 0,97	0,95 0,97

Контрольні питання до розділу 2

1. Загальні положення

- 1.1. Напишіть вираз для закону повного струму.
- 1.2. Який вигляд має закон повного струму щодо електричної машини?
- 1.3. Загальний вигляд виразу магніторушійної сили ділянки магнітного кола з відомою довжиною та питомою напруженістю магнітного поля.
- 1.4. Які ділянки виділяють у магнітному колі електричної машини?
- 1.5. Напишіть закон Ома для ділянки магнітного кола.

2. МРС повітряного проміжку

- 2.1. Напишіть вираз для МРС повітряного проміжку.
- 2.2. Що враховує коефіцієнт Картера (коефіцієнт повітряного проміжку)?
- 2.3. Як визначити розрахункову довжину, якщо осердя має радіальні канали?

- 2.4. Вкажіть числові значення індукції у повітряному проміжку електричних машин.
- 2.5. Що впливає на величину коефіцієнта Картера? Як його покращити?
3. *МРС зубців*
- 3.1. Загальний вираз для знаходження МРС зубців.
- 3.2. Як розрахувати МРС зубців, якщо обмотка всипна?
- 3.3. Як розрахувати МРС зубців, якщо обмотка жорстка чи стрижнева?
- 3.4. Показати методику розрахунку МРС зубців зі складною формою.
- 3.5. Як проводять розрахунок МРС сильно насичених зубців?
- 3.6. Числові значення індукції в зубцях?
4. *МРС ярем*
- 4.1. Які типи ярем розрізняють при розрахунку їх МРС?
- 4.2. Розрахунок МРС ярем статора і ротора машин постійного струму.
- 4.3. Розрахунок МРС ярем статора і ротора асинхронних машин.
- 4.4. Розрахунок МРС ярем статора і ротора синхронних машин.
- 4.5. Числові значення індукції в ярмах електричних машин.
5. *МРС полюсів*
- 5.1. Розрахунок МРС полюсів машин постійного струму.
- 5.2. Розрахунок МРС полюсів синхронних машин.
- 5.3. Показати поля розсіювання полюсів для машин постійного струму.
- 5.4. Показати поля розсіювання полюсів для синхронних машин.
- 5.5. Як уточнюється МРС полюсів явнополюсних синхронних машин?
- 5.6. Вказати числові значення індукції в полюсах електричних машин.

3. Розрахунок втрат в сталі

У магнітопроводі електричних машин втрати при перетворюванні енергії розділяють на:

- основні;
- додаткові.

Основні втрати обумовлені основним магнітним потоком і їх поділяють на:

- втрати на гістерезис;
- втрати на вихрові струми.

Втрати на гістерезис пропорційні площі петлі гістерезису (тобто пропорційні частоті зміни основного потоку) і квадрату індукції (теж основного потоку):

$$p_z \sim f, B^2 \quad (3.1)$$

Питомі втрати на вихрові струми у одиниці об'єму визначають формулою

$$p_{n.вс} = \frac{p_{вс}}{V} = \frac{2\pi^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot \Delta^2}{\rho_{см}} \quad (3.2)$$

де f – частота мережі;

B – індукція у к.з. контурі листа сталі;

Δ – товщина листа сталі магнітопроводу;

$\rho_{см}$ – питомий електричний опір електротехнічної сталі.

У загальному вигляді

$$p_m \sim f^2, B^2, \Delta^2, (1/\rho_{см}) \quad (3.3)$$

На практиці окремо втрат на гістерезис і вихрові струми не розраховують, а користуються питомими сумарними втратами на ці види втрат. Сумарні питомі втрати $p_{нум.баз}$ знаходять при конкретних індукції $B_{баз}$ (базовій) і частоті $f_{баз}$ (базовій). Наприклад, частіше задають експериментальні сумарні втрати для базових індукції $B_{баз} = 1\text{Тл}$ і частоті $f_{баз} = 50\text{Гц}$.

Якщо реальні індукція і частота мають величини B_x і f_x , то загальний вираз втрат у сталі з масою m_x має вигляд

$$p_x = p_{нум.баз} \cdot K_{\alpha x} \cdot \left(\frac{f_x}{f_{баз}}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{B_x}{B_{баз}}\right)^2 \cdot m_x \quad (3.4)$$

де α – показник степені, який враховує співвідношення втрат на гістерезис та вихрові струми; зі збільшенням частоти цей коефіцієнт зростає від 1,2 до 1,5.

Для різних марок сталі питомі втрати в сталі $p_{нум.баз}$ задають для $B_{баз} = 1\text{Тл}$ і частоті $f_{баз} = 50\text{Гц}$. Це дозволяє отримати формулу для розрахунку втрат у сталі статора машин змінного струму у вигляді [3, 4, 6]

$$p_{см} = p_{1/50} (K_{\alpha z} \cdot B_z^2 \cdot m_z + K_{\alpha a} \cdot B_a^2 \cdot m_a) \quad (3.5)$$

де B_z і B_a – відповідно індукція у зубцях і ярмі;

m_z і m_a – відповідно маси зубців і ярм;

$K_{\partial z}$ і $K_{\partial a}$ – коефіцієнти, які враховують збільшення у сталі відповідно зубців і ярма за рахунок штамповки і обробки листів сталі магнітопроводу; ці коефіцієнти залежать від потужності: при $P_2 < 160 \text{ кВт}$ $K_{\partial z} = 1,5 \dots 2,0$ і $K_{\partial a} \cong 1,5$ (без зняття задирок на листах); при $P_2 > 160 \text{ кВт}$ $K_{\partial z} \cong 1,7$ і $K_{\partial a} \cong 1,3$ (листи шліфують, знімаючи задирки).

Для машин постійного струму при визначенні втрат у сталі ярма треба використовувати (3.5), але з урахуванням частоти згідно (3.4).

Окремо необхідно зазначити, що втрати у сталі ярма ротора синхронних машин і ярмі статора машин постійного струму відсутні, тому що частота зміни магнітного потоку дорівнює нулю. У сталі ротора асинхронних машин, де частота перемагнічування мала, втратами нехтують.

Додаткові втрати поділяють на:

- поверхневі;
- пульсаційні.

Поверхневі втрати обумовлені присутністю шліців, які викликають появу вищих гармонік порядку зубчатості з частотою

$$f_{z1(2)} = \frac{Z_{2(1)} \cdot n}{60} \quad (3.6)$$

де $Z_{2(1)}$ відповідно кількість пазів відповідно ротора і статора зі шліцами.

Таким чином, при наявності пазів зі шліцами на роторі викликає втрати на поверхні зубців статора, а наявність пазів зі шліцами на статорі – на поверхні зубців ротора. При відсутності на одній зі сторін пазів із шліцами поверхневих страт на протилежній стороні відсутні.

Поверхневими втрати називають тому, що частота пульсації велика і магнітний потік вищих гармонік не проходить глибоко в зубці за рахунок відомого ефекту демпфірування. Наприклад, частота пульсації при $Z_1 = 36$ і частоті обертання $n = 1500 \text{ об/хв}$ складає згідно (3.6) 900 Гц .

В асинхронних машинах присутні шліці пазів на статорі і роторі. У цьому випадку знаходять питомі поверхневі втрати

$$p_{\text{пов.нут.1(2)}} = 0,5 K_{01(02)} \cdot \left(\frac{Z_{2(1)} \cdot n}{1000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01(02)} \cdot t_{2(1)} \cdot 10^3)^2 \quad (3.7)$$

де 0,5 – коефіцієнт, який враховує зменшення амплітуди первинного високочастотного поля за рахунок реакції поверхневих струмів;

$K_{01(02)}$ – коефіцієнт, яких характеризує механічну обробку (для потужностей $P_2 \leq 160 \text{ кВт}$ – $K_{01(02)} = 1,4 \dots 1,8$; для потужностей $P_2 > 160 \text{ кВт}$ – $K_{01(02)} = 1,7 \dots 2,0$);

$B_{01(02)}$ – амплітуда високочастотної індукції відповідно над зубцями статора і ротора (знаходять по рекомендаціям [3]).

Повні поверхневі втрати у цьому випадку складають

$$p_{\text{пов.1(2)}} = p_{\text{пов.нут.1(2)}} (t_{1(2)} - b_{u1(2)}) Z_{1(2)} \cdot l_{Fe} \quad (3.8)$$

де $b_{u1(2)}$ – відповідно шліці пазів статора і ротора.

Для синхронних явно полюсних машин поверхневі втрати на полюсних наконечниках ротора від наявності шліців у пазів статора дорівнюють

$$p_{\text{нов}} = 0,5 \cdot 2p \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l_{Fe} \cdot K_c \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3} \quad (3.9)$$

де α – коефіцієнт полюсного перекриття;

B_0 – амплітуда пульсації гармонік порядку зубчатості (визначають по [3]).

Аналогічно (3.9) можна визначити втрати на поверхні полюсів машин постійного струму.

Пульсаційні втрати виникають тільки при одночасній наявності шліців пазів на роторі і статорі. У цьому випадку виникають пульсації основного потоку у зубцях за рахунок зміни магнітної проникності повітряного проміжку. Виділяються пульсаційні втрати у зубцях статора і ротора. Величини цих втрат знаходяться за виразом

$$p_{\text{пульс.1(2)}} \cong 0,11 \cdot \left(\frac{Z_{1(2)} \cdot n \cdot B_{\text{пульс.1(2)}}}{10000} \right)^2 \cdot m_{z1(2)} \quad (3.10)$$

де 0,11 – емпіричний коефіцієнт, який враховує вплив вторинних факторів;

$m_{z1(2)}$ – відповідно маса зубців статора і ротора;

$B_{\text{пульс.1(2)}}$ – амплітуда індукції пульсації (знаходять по рекомендаціям [3]).

До додаткових втрат відносять втрати, які виникають в машині за рахунок полів розсіювання, комутації та інших вторинних факторів. Ці втрати враховують як:

- 0,5 % від корисної потужності генератора або підведеної до двигуна для синхронних машин, потужність яких не більше 1000 кВт·А;

- 0,25...0,4 % - те ж саме для більших потужностей;

- $0,01 \cdot \frac{P_n}{\eta_n}$ - для некомпенсованих машин постійного струму;

- $0,005 \cdot \frac{P_n}{\eta_n}$ - для компенсованих машин постійного струму.

Ці значення додаткових втрат приймають для номінальних потужностей. При інших значеннях навантаження ці втрати перераховують

$$p_{\text{доп}} = p_{\text{доп.н}} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (3.11)$$

Суму основних і додаткових втрат вважають втратами в магнітному колі, які входять до повних втрат у машині і впливають на величину ККД.

Задача 3.1.

Розрахувати основні втрати в магнітопроводі 4-х полюсного двигуна постійного струму з паралельним збудженням, потужність якого $P_n=7,5$ кВт, номінальна напруга $U_n=220$ В, частота обертання $n_n=1500$ об/хв, висота осі обертання $h=160$ мм. Додатково відомо: діаметр якоря $D=0,156$ м, довжина осердя ротора $l_s=0,157$ м, індукція у зубцях якоря $B_z=1,72$ Тл, індукція в ярмі якоря $B_a=0,95$ Тл, коефіцієнт заповнення якоря сталлю $K_c=0,94$, питомі втрати в сталі $p_{1,0/50}=1,75$ Вт/кг, а маса сталі зубцевої зони якоря $m_z=4,93$ кг, маса сталі ярма якоря $m_a=7,5$ кг.

Задача 3.2.

Визначити основні втрати в АД, який має наступні дані: потужність $P_n=15$ кВт, номінальна напруга $U_n=220/380$ В, номінальна частота обертання $n_n=1500$ об/хв, зовнішній діаметр статора $D_a=0,272$ м, висота ярма статора $h_a=0,0217$ м, осердя магнітопроводу виготовлено зі сталі марки 2013, індукція в зубцях статора $B_{z1}=1,81$ Тл,

індукція в ярмі $B_a=1,65$ Тл, висота зубця статора $h_{z1}=21,8 \cdot 10^{-3}$ м, ширина зубця статора $b_{z1}=4,8 \cdot 10^{-3}$, кількість зубців статора $Z_1=48$, $K_{da}=1,6$ та $K_{dz}=1,8$ - коефіцієнти, які враховують збільшення втрат, питома маса сталі $\gamma_c=7800$ кг/м³.

Задача 3.3.

Двигун постійного струму має номінальні дані: потужність $P_{2H}=7,5$ кВт, напруга $U_H=220$ В, швидкість обертання $n_H=1000$ об/хв, зовнішній діаметр якоря $D_2=90$ мм, контактна площа всіх щіток $S_{\Sigma щ}=9600$ мм², швидкість колектора при номінальній частоті обертання $V_k=10,47$ м/с, падіння напруги на щітках $\Delta U_{щ}=2$ В, опір якірної обмотки, який розрахований при стандартній робочій температурі $R_{a75^\circ C}=0,032$ Ом, максимальний струм збудження обмотки головних полюсів $I_{bmax}=1,05$ А, ступінь захисту IP22, спосіб охолодження IC01, втрати в сталі зубців якоря $P_{z2}=180$ Вт, магнітні втрати в сталі ярма якоря $P_{c2}=139$ Вт. Знайти сумарні втрати у двигуні.

Задача 3.4.

Визначити основні втрати в магнітопроводі двигуна постійного струму потужністю $P_H=7,5$ кВт, що має номінальну напругу $U_H=220$ В, номінальну частоту обертання $n_H=1500$ об/хв., індукцію в перерізі зубців якоря $B_z=1,72$ Тл, індукцію у ярмі якоря $B_j=0,945$ Тл, питомі втрати в сталі $P_{1,0/50}=1,75$ Вт/кг, кількість пазів якоря $Z=29$, ширину зубця $b_z=6,8 \cdot 10^{-3}$ м, довжина осердя якоря $l_\delta=0,157$ м, діаметр якоря $D=156 \cdot 10^{-3}$ м, внутрішній діаметр якоря (діаметр валу) $d_b=46 \cdot 10^{-3}$ м. Напівзакриті овальні пази якоря мають: висоту пазу $h_n=266 \cdot 10^{-3}$ м, більший радіус $r_1=4,5 \cdot 10^{-3}$ м, менший радіус $r_2=2,52 \cdot 10^{-3}$ м, відстань $h_1=18,22 \cdot 10^{-3}$ м. Сталь марки 2312, коефіцієнт заповнення пакета якоря сталлю $K_c=0,94$.

Задача 3.5.

Визначити поверхневі втрати в синхронному явнополюсному двигуні, потужність якого $P_H=500$ кВт, номінальна напруга $U_H=6000$ В, частота обертання $n_H=500$ об/хв, висота осі обертання $h=160$ мм. Додатково відомо: діаметр ротора $D_2=0,9$ м, повітряний проміжок $\delta=0,002$ м, довжина полюса $l_m=l_1=0,36$ м, число пазів статора $Z_1=90$, індукція у повітряному проміжку $B_\delta=0,86$ Тл, коефіцієнт Картера $K_\delta=K_{\delta 1}=1,25$, коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha=0,7$, коефіцієнт збільшення втрат $K_o=6$.

Задача 3.6.

Визначити поверхневі втрати в сталі осердя синхронного двигуна, дані якого наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Дані	Варіанти			
	1	2	3	4
Номінальна потужність, P_H , кВт	250	500	800	2000
Номінальна напруга, U_H , В	6000	6000	6000	6000
Кількість пар полюсів, p	2	6	8	12
Індукція при $E=U_{фн}$, $B_{\delta o}$, Тл	0,86	0,79	0,73	0,88
Кількість зубців статора, Z_1	60	90	108	144
Номінальна частота обертання, n_1 , об/хв.	1500	500	375	250
Довжина осердя статора, l_1 , м	0,252	0,36	0,336	0,51
Полюсний поділ, τ , м	0,41	0,236	0,27	0,242
Зубцевий крок статора, t_1 , м	0,027	0,0314	0,04	0,04

Коефіцієнт полюсного перекриття, α	0,68	0,7	0,7	0,7
Коефіцієнт Картера, K_δ	1,18	1,25	1,31	1,34
Коефіцієнт K_o	4,6	6,0	4,6	4,6

Задача 3.7.

Визначити поверхневі та пульсаційні втрати в роторі АД з фазним ротором, який має наступні дані: потужність $P_n=14,5$ кВт, номінальна напруга $U_n=220/380$ В, $2p=4$, індукція в повітряному проміжку $B_\delta=0,75$ Тл середнє значення індукції у зубці ротора $B_{z2cp}=1,8$ Тл, повітряний проміжок $\delta=0,5 \cdot 10^{-3}$ м, розрахункова довжина осердя $l_\delta=0,12$ м, зубцевий крок статора $t_1=12,1 \cdot 10^{-3}$ м, ротора - $t_2=15,2 \cdot 10^{-3}$ м, висота зубця ротора $h_{z2}=32 \cdot 10^{-3}$ м, ширина зубця (середня) $b_{z2cp}=6,5 \cdot 10^{-3}$, ширина шліця пазу статора $b_{ш1}=3,7 \cdot 10^{-3}$ м, а ротора – $b_{ш1}=1,5 \cdot 10^{-3}$ м, кількість зубців статора $z_1=48$, а ротора - $z_2=48$, коефіцієнт заповнення сталлю $K_c=0,96$, коефіцієнт Картера $K_\delta=1,25$, коефіцієнт обробки ротора $K_{обр2}=1,7$.

Задача 3.8.

Синхронний двигун має наступні дані: потужність $P_n=450$ кВт, номінальна напруга $U_n=6000$ В. Відомо також: номінальна частота обертання $n_n=500$ об/хв, частота мережі $f=50$ Гц, коефіцієнт потужності $\cos\varphi=0,9$ (випереджаючий), $\eta_n=0,937$, струм в обмотці збудження $I_b=250$ А, активний опір обмотки збудження $r_b=0,164$ Ом, перехідне падіння напруги в щітковому контакті кілець $\Delta U_{щ}=1$ В, маса ярма і зубців якоря відповідно $m_a=505$ кг та $m_z=315$ кг, коефіцієнти збільшення основних втрат $K_{да}=1,3$, $K_{дз}=1,7$, індукція на висоті 1/3 висоти паза $B_{z1/3}=1,6$ Тл, індукція в ярмі $B_a=1,25$ Тл, довжина осердя статора $l_1=0,36$ м, внутрішній діаметр розточки статора $D=0,9$ м. Знайти основні, додаткові та сумарні втрати двигуна.

Задача 3.9.

Визначити суму втрат в сталі АД, який має наступні дані, потужність $P_n=15$ кВт, номінальна напруга $U_n=220/380$ В, $2p=4$. Також відомо: маса зубців статора $m_z=4,94$ кг, маса сталі ярма $m_a=16,7$ кг, індукція у зубцях статора $B_{z1}=1,81$ Тл, індукція в ярмі статора $B_a=1,65$ Тл, кількість зубців статора $Z_1=48$, $K_{да}=1,6$, $K_{дз}=1,8$ - коефіцієнти, які враховують збільшення втрат в ярмі та зубцях, кількість зубців ротора $Z_2=38$, зубцевий крок статора $t_1=12,1 \cdot 10^{-3}$ м, а ротора - $t_1=15,2 \cdot 10^{-3}$ м, ширина шліця статора $b_{ш1}=3,7 \cdot 10^{-3}$ м, а ротора – $b_{ш2}=1,5 \cdot 10^{-3}$ м, довжина осердя ротора $l_2=0,13$ м, коефіцієнт обробки ротора $K_{обр2}=1,5$, індукція у повітряному проміжку $B_\delta=0,75$ Тл, коефіцієнт Картера $K_\delta=1,22$, $m_{z2}=7,77$ кг - маса зубців ротора.

Задача 3.10.

Синхронний генератор має наступні дані: потужність $S_n=30$ кВ А, номінальна лінійна напруга $U_n=400$ В. Відомо також: номінальна частота обертання $n_1=1500$ об/хв, частота напруги $f=50$ Гц, кількість фаз статора $m=3$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi=0,8$, ККД – $\eta_n=0,998$, з'єднання обмоток статора - У, збудження здійснюється спеціальною обмоткою, яка вкладена в пази статора; кількість зубців статора $z_1=42$, пазовий крок статора $t_1=12,4 \cdot 10^{-3}$ м, полюсний поділ $\tau=0,2245$ м, довжина шихтованого осердя полюса $l_n=0,17$ м, коефіцієнт, який залежить від співвідношення $b_{ш}/\delta - \beta_0=0,35$, коефіцієнти збільшення втрат $K_{да}=1,3$, $K_{дз}=1,7$, індукція у спинці статора $B_a=1,61$ Тл, середня індукція у зубцях статора $B_{z1}=1,74$ Тл, індукція у повітряному проміжку $B_\delta=0,73$ Тл, коефіцієнт Картера $K_\delta=1,16$, коефіцієнт, який залежить від форми полюсного наконечника - $K_n=1$, коефіцієнт полюсної дуги $\alpha=0,66$, маса ярма

статора $m_a=50$ кг, маса зубців статора $m_{z1}=11,9$ кг, осердя статора виготовлено зі сталі марки 2013. Знайти основні та додаткові втрати в осерді статора СГ. Розрахунок проводити по [2].

Задача 3.11.

Розрахувати сумарні втрати і визначити ККД трифазного асинхронного двигуна серії 4А, дані якого в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Дані	Варіанти			
	1	2	3	4
Номінальна потужність, P_n , кВт	110	132	90	11
Номінальна напруга, U_n , В	220	380	220	220
Кількість пар полюсів, p	10	4	4	2
Висота осі обертання, h , мм	355	280	250	132
Марка сталі	2312	2013	2013	2013
Фазний струм: статора, I_1 , А ротора, I_2 , А	215,9 461,5	138,3 783,3	161,1 650,9	21,0 490,7
Індукція в статорі: у зубці, B_{z1} , Тл у спинці B_{a1} , Тл	1,56 1,3	1,6 1,45	1,578 1,375	1,65 1,623
Активний опір фаз при $t=115^\circ$: статора, r_1 , Ом ротора, r_2 , Ом	0,0248 0,02	0,052 7,3-10'5	0,032 5.5-10'5	0,41 0,275
Маси: зубців статора, m_{z1} , кг ярма статора, m_{a1} , кг	80,807 128,21	50 124,5	28,6 94,76	3,1 17,75
Коефіцієнти додаткових втрат: у зубцях статора, $K_{\delta z}$ у ярмі статора, $K_{\delta z}$	1,8 1,6	1,8 1,6	1,8 1,6	1,8 1,6
Механічні втрати, $P_{\text{мех}}$, Вт	231,2	960,24	573,6	230,66
Додаткові втрати, $P_{\text{дод}}$, Вт	588,24	709,6	483,9	62,5

Задача 3.12.

Визначити основні та додаткові втрати в сталі синхронного двигуна, дані якого в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Дані	Варіанти			
	1	2	3	4
Номінальна потужність, P_n , кВт	5000	2000	800	4000
Номінальна напруга, U_n , В	6000	6000	6000	10000
Номінальний струм, I_n , А	555,1	223	91	268,7
Частота обертання, n_n , об/хв.	250	375	250	1000
Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	0,9	0,9	0,9	0,9
Частота мережі, f_1 , Гц	50	50	50	50

Таблиця 3.3

Дані	Варіанти			
	1	2	3	4
Коефіцієнт, що враховує обробку ярма, K_a зубців, K_z	1,3 1,7	1,3 1,7	1,3 1,7	1,3 1,7
Питомі втрати в сталі осердя, $P_{1,0/50}$, Вт/кг	1,55	1,55	1,55	1,55
Індукція: у ярмі, B_a , Тл у зубцях статора, B_{z1} , Тл у повітряному проміжку, B_δ , Тл	1.42 1,77 0.873	1,31 1,6 0,905	1,1 1,74 0,923	1,39 1,77 0,87
Маса: ярма, m_a , кг зубців, m_z , кг	3212,5 2274	158,74 967,66	799,4 500,7	3235 910
Кількість полюсів, $2p$	24	16	24	6
Коефіцієнт полюсного перекриття, α	0,73	0,7	0,7	0,66
Полюсний поділ, τ , м	0,55	0,35	0,19	0,52
Кількість зубців статора, Z_1	180	120	144	72
Коефіцієнт Картера, K_δ	1,24	1,22	1,295	1,34
Довжина осердя статора, l_1 , м	4,6	4,6	4,6	4,6
Зубцевий крок статора, t_1 , м	0,0506	0,046	0,032	0,044
Коефіцієнт K_0	1,0	1,0	1,0	0,956

Контрольні питання до розділу 3

1. Загальні положення.

- 1.1. Які втрати складають повні втрати в сталі електричної машини? На які показники вони впливають?
- 1.2. Якими магнітними потоками зумовлені складові повних втрат в сталі?
- 1.3. Чому магнітопроводи електричних машин виготовляють з електротехнічної сталі? Чим відрізняються між собою електротехнічні сталі?
- 1.4. Що розуміють під терміном “питомі втрати” в сталі? Для розрахунку яких втрат вони використовуються?
- 1.5. Які основні фактори (параметри) впливають на втрати в сталі?

2. Основні втрати в сталі.

- 2.1. Чому виникають і де мають місце основні втрати в сталі? На що вони впливають?
- 2.2. Які складові обумовлюють основні втрати в сталі? Як ці складові залежать від величин частоти та індукції?
- 2.3. Який загальний вигляд має вираз для основних втрат в сталі?
- 2.4. Запишіть вираз для визначення основних втрат в сталі
- 2.5. електричних машин змінного струму?
- 2.6. Які шляхи зменшення основних втрат в сталі електричних машин?

3. Поверхневі втрати в сталі.

- 3.1. Коли і де виникають поверхневі втрати?
- 3.2. Поясніть фізичну картину виникнення поверхневих втрат.
- 3.3. Поясніть наявність коефіцієнтів у виразах для розрахунків поверхневих втрат.

3.4. Від яких величин (параметрів) залежать поверхневі втрати?

3.5. Які засоби зниження поверхневих втрат?

4. *Пульсаційні втрати.*

4.1. Коли і де виникають пульсаційні втрати?

4.2. Поясніть фізичну картину виникнення пульсаційних втрат.

4.3. Як впливає відкриття пазів на величину пульсаційних втрат?

4.4. Як впливає величина повітряного проміжку на пульсаційні втрати?

4.5. Як зменшити пульсаційні втрати?

4. Розрахунок параметрів схем заміщення

Для отримання шляхом розрахунків реальних кількісних показників експлуатаційних режимів електричних машин використовують схеми заміщення. У ці схеми входять електричні опори, які у кількісному вигляді відображають фізичні процеси при перетворенні енергії в електричних машинах. Найбільшого розповсюдження ці схеми заміщення знаходять для асинхронних електричних машин змінного струму, куди в загальному випадку входять опори:

- активні опори обмоток, які характеризують втрати потужності в цих обмотках;
- реактивні індуктивні опори взаємоіндукції, які характеризують вплив основного магнітного потоку на величину ЕРС взаємоіндукції;
- реактивні індуктивні опори розсіювання, які характеризують кількісний вплив магнітних потоків розсіювання.

Активний опір однієї фази обмотки машин змінного струму визначають при температурі t

$$r_t = \rho_t \frac{l_{w.cp} \cdot W}{a \cdot q_{ef}} \cdot K_R \quad (4.1)$$

де ρ_t – питомий електричний опір при температурі $t=75^\circ\text{C}$ для класу нагрівостійкості ізоляції провідника «В» та 115°C – для класу нагрівостійкості ізоляції «F» і «H»;

$l_{w.cp}$ – середня довжина витка;

$W = u_n \cdot Z / (2am)$ – кількість послідовних витків у фазі;

q_{ef} – ефективна площа перерізу провідника, по якому тече струм паралельної вітки;

K_R – коефіцієнт, який враховує збільшення омичного опору (втрат) провідників при змінному струмі.

Вираз для активного опору якоря машин постійного струму має вигляд

$$r_{at} = \rho_{at} \frac{l_{a.w.cp} \cdot W_a}{2a \cdot q_{ef}} = \rho_{at} \frac{l_{a.w.cp} \cdot N}{2 \cdot 2a \cdot q_{ef}} \cdot K_R \quad (4.2)$$

де N – кількість провідників якоря, по яким тече струм паралельної вітки;

$2a$ – кількість паралельних віток, яка залежить від типу обмотки якоря;

інші позначення аналогічні виразу (4.1).

Окремо треба відзначити, що $l_{w.cp}$ та $l_{a.w.cp}$ включає дві активні сторони і дві лобових частин. Вирази для визначення цих довжин залежить від типів машин і обмоток [2, 3, 4, 6].

Коефіцієнт K_R враховує ефект витіснення у пазовій і лобовій частинах обмотки. Для пазової частини обмотки коефіцієнт більше (втрати більше, більший потік розсіювання пересікає провідник у пазу), а у лобовій частині менше, де вказаний фактор впливу поля розсіювання менш.

У разі необхідного визначення повного K_R краще скористатися конспектом лекцій [6], де наведені складні формули та рекомендації.

Особливо треба відмітити, що у разі використання виспних обмоток з діаметром провідника менш 1,4...1,8 мм при стандартній частоті мережі коефіцієнт K_R дорівнює одиниці. У жорстких та стержневих обмотках необхідно використовувати

прямокутні провідники з площею перерізу 17...20 мм², розташовувати його у пазу більшою стороною до дна паза. Ці заходи зменшують K_R (і втрати) в обмотці при стандартній частоті мережі.

Активний опір суттєво залежить від частоти протікаючого струму, тому при малих частотах можуть бути відхилення від вище наведених рекомендацій.

Треба відмітити, що зі збільшеннями активного опору зменшується ККД і збільшується швидкість згасання вільної складової несталого процесу.

При проектуванні доцільно порівнювати розрахункові ККД у відносних одиницях з заданими. Якщо має місце незначне відхилення, то це свідчить про вірність розрахунку.

Індуктивний реактивний опір взаємоіндукції характеризує магнітний зв'язок статора з ротором. В асинхронних машинах цей опір позначають X_m , в явно полюсних синхронних машинах - X_{ad} (по поздовжній осі) та X_{aq} (по поперечній осі).

Цей опір суттєво залежить від електромагнітних навантажень, геометрії машини, витків обмотки та повітряного проміжку між статором і ротором. Вже цей перелік показує, що аналітичні залежності по знаходженню X_m мають бути складними. Наприклад, для асинхронних машин індуктивний опір взаємоіндукції

$$X_m = \frac{E_1}{I_\mu} = \frac{4}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot m \cdot f_1 \frac{(W_1 \cdot K_{o61})^2}{\delta \cdot p \cdot K_n} \tau \cdot l_\delta \quad (4.3)$$

де, крім відомих за позначенням величин, входить коефіцієнт насичення магнітної системи K_n та струм намагнічування I_μ .

Збільшення повітряного проміжку у синхронних машин з метою збільшення статичної стійкості зменшує магнітний зв'язок і опір взаємоіндукції. Аналітичні вирази та межі зміни цих опорів наведені в [1, 6].

У рівняння рівноваги ЕРС робочої обмотки машини крім ЕРС від основного потоку входить ЕРС розсіювання, яка є сумою ЕРС від потоків розсіювання: пазового, лобового та диференціального.

Загальний вираз індуктивного опору, який при добутку на відповідний струм дорівнює повній ЕРС розсіювання, має вигляд

$$X_{\delta 1(2)} = 4\pi \cdot \mu_0 \cdot l_\delta \cdot f \frac{W_{1(2)}^2}{p \cdot q_{1(2)}} \cdot (\lambda_{n1(2)} + \lambda_{o1(2)} + \lambda_{\lambda 1(2)}) \quad (4.4)$$

де цифра 1 – для обмоток якорів (статора асинхронних машин);

цифра 2 – для обмоток роторів фазних і короткозамкнутих роторів асинхронних машин;

λ_n , λ_o і λ_λ – відповідно магнітні провідності паза, диференціальна та лобова.

Загальний аналітичний вираз, отриманий для магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_n = \int_0^h \left(\frac{N_x}{N_i} \right)^2 \frac{dx}{b_x} \quad (4.5)$$

де N – кількість провідників у пазу висотою h ;

N_x – кількість провідників на висоті паза h_x ;

b_x – ширина паза та висоти паза h_x ;

dx – товщина магнітної силової трубки.

Формула (4.5) може трансформуватися в залежності від форми паза та його заповнення провідниками [3, 6].

Загальний аналітичний вираз для диференціального та лобового розсіювання отримати неможливо, що пояснюється впливом багатьох конструктивних факторів (розмір шліців, повітряних проміжків між конструктивними частинами, типу обмотки, вильоту лобових частин обмотки і т.і.). У зв'язку з цим використовують напівемпіричні формули [2,3,4,5,6]. Вигляд цих формул залежить від конкретної потужності та геометрії машини. Наприклад, магнітна провідність диференціального розсіювання для асинхронних машин має вираз

$$\lambda_o = \xi \frac{t}{12\delta \cdot K_\delta} \quad (4.6)$$

де ξ – коефіцієнт, який залежить від числа пазів на полюс і фазу, кроку обмотки і відношення ширини шліця до величини повітряного проміжку b_w/δ [3, 4, 6].

Для синхронних машин магнітна провідність для диференціального розсіювання має вигляд

$$\lambda_o = 0,03 \frac{\tau \cdot a_\delta}{\delta \cdot K_\delta \cdot q} \quad (4.7)$$

де τ – довжина полюсної дуги (полюсний поділ);

a_δ – коефіцієнт полюсного перекриття;

q – кількість пазів на полюс і фазу.

Аналогічний підхід до визначення магнітної провідності лобового розсіювання.

Широке використання асинхронних двигунів з к.з. ротором вимагає при проектуванні визначити активний опір та індуктивність розсіювання ротора.

Активний опір визначають згідно з формулою

$$r_2 = r_c + 2r_k/\Delta^2 \quad (4.8)$$

де r_2 – ефективний опір к.з. обмотки, введений з умови рівності втрат потужності приведенного і реального к.з. ротора;

r_c – реальний активний опір стрижня к.з. обмотки;

r_k – реальний активний опір к.з. кільця;

$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}$ – коефіцієнт приведення струму кільця до струму стрижня.

Для знаходження індуктивного опору к.з. ротора можна використати формулу (4.4), але враховуючи, що к.з. обмотка має кількість фаз $m_2 = Z_2$ і кількість пазів на полюс і фазу $q_2 = 1/2p$, використовують вираз

$$X_2 = 7,9 f_1 \cdot l_\delta \cdot 10^{-6} (\lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{r2}) \quad (4.9)$$

де залежності λ_{n2} , λ_{o2} і λ_{r2} визначають по рекомендаціям [2, 3, 4].

Окремо необхідно вказати, що магнітна пазова провідність знаходиться по рекомендаціям [2, 3, 4, 6] в залежності від форм пазу, розташування провідників у пазу і від кількості шарів обмоток.

Для приведення ефективних значень опорів к.з. роторів до витків обмотки статора, що дає змогу використовувати їх у схемі заміщення, використовують вираз приведення параметрів фазної обмотки ротора. Для к.з. ротора у цей вираз підставляють:

- $m_2 = Z_2$ – кількість фаз;
- $W_2 = 0,5$ – кількість послідовних витків у фазі;
- $K_{i\delta 2} = K_{\tilde{n}2}$ – обмотковий коефіцієнт дорівнює коефіцієнту скосу.

В результаті коефіцієнт приведення опорів ротора до витків статора має вигляд

$$K_2 = \frac{4m_1(W_1 \cdot K_{i\delta 1})^2}{Z_2 \cdot K_{\tilde{n}2}^2} \quad (4.10)$$

Для контролю отриманих при проектуванні величин параметрів обмоток треба орієнтуватись на наступні відносні значення їх [1]:

- * $X_m = 50 \dots 100$ – для трансформаторів загального призначення;
- * $X_m = 2 \dots 4$ – для асинхронних машин загального призначення;
- * $X_m = 1,1 \dots 2,5$ – для турбогенераторів та неявно полюсних синхронних машин;
- * $X_{ad} = 0,5 \dots 1,5$ – для явнополюсних синхронних машин по поздовжній осі;
- * $X_{aq} = 0,3 \dots 0,9$ – для явно полюсних синхронних машин по поперечній осі;
- * $X_\sigma = 0,1 \dots 0,2$ – опір розсіювання обмоток статора і ротора електричних машин.

Важливо при проектуванні пам'ятати:

- параметри залежать від електромагнітних навантажень

$$X, r \sim \frac{A}{B_\delta} \quad (4.11)$$

- ковзання асинхронних машин у номінальному режимі дорівнює активному опору обмотки ротора у відносних одиницях

$$\dot{s} = \dot{r}'_2 \quad (4.12)$$

Задача 4.1.

Визначити втрати, обумовлені ефектом витиснення, у обмотці статора синхронного двигуна загального призначення потужністю 560кВт, $U_{\text{нф}}=3464$ В, $n_n=600$ об/хв, $f=50$ Гц, якщо відомо: втрати в міді обмотки статора, при постійному струмі (омічні) при $t=75^\circ$ С дорівнюють 14,2 кВт, по висоті паза розміщено $m=18$ провідників, розміри кожного провідника $h \times b=3,0 \times 8,0$ мм (не враховуючи ізоляцію), ширина паза $b=12,7$ мм, питомий опір міді при $t=75^\circ$ С $\rho=2,17 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, довжина секції, яка лежить у пазі $L_c=24$ см, довжина лобової частини секції (з однієї сторони) $L_\pi=57$ см.

Задача 4.2.

Визначити втрати, обумовлені ефектом витиснення, в обмотці статора синхронного двигуна загального призначення потужністю 560 кВт, $U_{\text{нф}}=3464$ В, $n_n=600$ об/хв, $f=50$ Гц, якщо відомо: втрати в міді обмотки статора (омічні) при $t=75^\circ$ С дорівнюють 14,2 кВт, по висоті паза розміщено $m=18$ провідників, розміри кожного провідника $h \times b=2,5 \times 7,5$ мм (не враховуючи ізоляцію), ширина паза $b=12,7$ мм, пи-

томий опір міді при $t=75^{\circ}\text{C}$ $\rho=2,17 \cdot 10^{-8}$ Ом м, довжина секції, яка лежить у пазу $L_c=24$ см, довжина лобової частини секції (з однієї сторони) $L_{\text{л}}=27$ см.

Задача 4.3.

Визначити втрати, обумовлені ефектом витиснення, у обмотці статора синхронного двигуна загального призначення потужністю 560 кВт, $U_{\text{нф}}=3464$ В, $n_n=600$ об/хв, $f=50$ Гц, якщо відомо: основні втрати в міді обмотки статора (омічні) при $t=75^{\circ}\text{C}$ дорівнюють 14,2 кВт, по висоті паза розміщено $m=18$ провідників, розміри кожного провідника $h \times b=1,95 \times 6,9$ мм (не враховуючи ізоляцію), ширина паза $b=12,7$ мм, питомий опір міді при $t=75^{\circ}\text{C}$ $\rho=2,17 \cdot 10^{-8}$ Ом м, довжина секції, яка лежить у пазі $L_c=24$ см, довжина лобової частини секції (з однієї сторони) $L_{\text{л}}=27$ см.

Задача 4.4.

Визначити активний опір фази обмотки статора гідрогенератора потужністю $S_n=90$ МВ·А, $U_n=13,8$ кВ, $\cos\varphi=0,8$, $f=50$ Гц, $n_n=83,3$ об/хв, $m=3$, якщо відомо: омичний опір фази при $t=75^{\circ}\text{C}$ дорівнює 0,0061 Ом, ширина паза $b=27,5$ мм, мідь провідників займає ширину $b=14,8$ мм, розміри елементарного провідника $b \times h=7,4 \times 2,63$ мм (не враховуючи ізоляцію), питомий опір міді при $t=75^{\circ}\text{C}$ $\rho=2,17 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, довжина секції у пазовій частині $L_c=175,5$ см, лобової частини $L_{\text{л}}=90$ см, кількість провідників по висоті паза $m=21$.

Задача 4.5.

Визначити активний опір фази обмотки статора гідрогенератора потужністю $S_n=90$ МВ·А, $U_n=13,8$ кВ, $\cos\varphi=0,8$, $f=50$ Гц, $n_n=83,3$ об/хв, $m=3$, якщо відомо: омичний опір фази при $t=75^{\circ}\text{C}$ дорівнює 0,0061 Ом, ширина пазу $b=27,5$ мм, мідь провідників займає ширину $b=16$ мм, розміри елементарного провідника $b \times h=8,0 \times 3,0$ мм (не враховуючи ізоляцію), питомий опір міді при $t=75^{\circ}\text{C}$ $\rho=2,17 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, довжина секції у пазовій частині $L_c=175,5$ см, лобової частини $L_{\text{л}}=90$ см, кількість провідників по висоті паза $m=21$.

Задача 4.6.

При температурі $t=75^{\circ}\text{C}$ визначити у відносних одиницях активний опір ротора трифазного асинхронного двигуна з к.з. ротором, який має $P_n=13$ кВт, $U_{\text{нф}}=220$ В, $I_{\text{нф}}=25,3$ А, $n_n=1500$ об/хв, $f=50$ Гц. Додатково відомо: кількість послідовних витків у фазі обмотки статора $W=120$, обмотковий коефіцієнт обмотки статора $K_{\text{об1}}=0,902$, кількість зубців ротора $Z_2=46$, переріз стрижня ротора $q_c=100$ мм², довжина стрижня ротора $L_2=12,8$ см, переріз к.з. кільця $q_k=460$ мм², середній діаметр КЗ кільця клітки $D_{\text{кп}}=15$ см. Ефект витиснення не враховувати.

Задача 4.7.

Визначити у відносних одиницях приведені значення активного опору к.з. ротора трифазного асинхронного двигуна, який має потужність 160 кВт, $U_n=380/660$ В, $I_n=165$ А, $2p=4$. Додатково відомо: діаметр ротора $D=0,36$ м, довжина пакета ротора $L=0,26$ м, кількість пазів статора $Z_1=72$, кількість пазів ротора $Z_2=62$, обмотковий коефіцієнт статора $K_{\text{об1}}=0,91$, кількість паралельних віток статора $a=4$, кількість провідників у пазі статора $U_n=16$, висота кільця ротора $h_{\text{кл}}=0,055$ м, переріз стрижня ротора $q_c=230 \cdot 10^{-6}$ м² та кільця $q_k=1300 \cdot 10^{-6}$ м². Клас ізоляції F (питома провідність алюмінію $\rho=10^{-8}/23$ Ом·м).

Задача 4.8.

Визначити у відносних одиницях приведені значення активного опору к.з. ротора трифазного асинхронного двигуна, який має потужність 160 кВт, $U_H=380/660$ В, $I_H=165$ А, $2p=4$. Додатково відомо: діаметр ротора $D=0,36$ м, довжина пакета ротора $L=0,26$ м, кількість пазів статора $Z_1=72$, кількість пазів ротора $Z_2=62$, обмотковий коефіцієнт статора $K_{об1}=0,91$, кількість паралельних віток обмотки статора $a=4$, кількість провідників у пазі статора $U_{п1}=16$, висота кільця ротора $h_{кл}=0,055$ м, переріз стрижня ротора $q_c=230 \cdot 10^{-6}$ м² та кільця $q_k=1300 \cdot 10^{-6}$ м². Клас ізоляції F (питома провідність алюмінію $\rho=10^{-6}/23$ Ом·м).

Задача 4.9.

Знайти приблизне значення індуктивного опору взаємоіндукції у відносних одиницях, асинхронного двигуна, використовуючи дані у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_2 , кВт	4	11	45	90	200	315
Номінальна фазна напруга U_{ϕ} , В	220	220	380	380	380	380
Номінальний фазний струм I_{ϕ} , А	7,9	21	55	109	211	326
Коефіцієнт корисної дії ККД, в.о.	0,865	0,88	0,91	0,92	0,925	0,93
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$, в.о.	0,89	0,9	0,9	0,9	0,9	0,91

Задача 4.10.

Визначити індуктивний опір взаємоіндукції у відносних одиницях по даним, наведеним у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_2 , кВт	3	7,5	11	15	22	30
Номінальна фазна напруга U_{ϕ} , В	220	220	220	220	220	220
Номінальний фазний струм I_{ϕ} , А	7,7	16,4	21,9	16,9	41,4	56
МРС на пару полюсів F, А	700	869	952	1043	1778	1206
Кількість послідовних витків у фазі w_1	256	144	104	184	72	64
Обмотковий коефіцієнт $k_{об1}$	0,966	0,96	0,858	0,958	0,924	0,925
Кількість полюсів $2p$	8	6	4	4	2	4

Задача 4.11.

Знайти опір взаємоіндукції у відносних одиницях для трифазного асинхронного двигуна з к.з. ротором, дані якого наведені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_2 , кВт	5,5	7,5	11	18,5	37	55
Номінальна фазна напруга U_{ϕ} , В	220	220	220	220	380	380
Номінальний фазний струм I_{ϕ} , А	10,5	14,7	21	34,4	43,4	57,6
Кількість полюсів $2p$	2	2	2	2	8	2
Діаметр розточки D, мм	90	126	122	147	332	208
Розрахункова довжина l_{δ} , мм	147	125	142	122	182	180
Ефективний повітряний проміжок δ' , мм	0,55	0,74	0,72	1,09	0,81	1,13

Таблиця 4.3

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Кількість послідовних витків у фазі w_1	112	96	76	84	138	78
Обмотковий коефіцієнт $k_{об1}$	0,958	0,928	0,958	0,913	0,9	0,898
Коефіцієнт насичення магнітного кола	1,31	1,29	1,27	1,36	1,19	1,23

Задача 4.12.

Визначити величини МРС на пару полюсів, струм намагнічування та індуктивний опір взаємоіндукції у відносних одиницях трифазного асинхронного двигуна з к.з. ротором. Дані для розрахунків наведені у табл. 4.4. Частота мережі 50 Гц.

Таблиця 4.4

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_2 , кВт	4	7,5	15	37	45	55
Номінальна фазна напруга U_H , В	220	220	220	220	380	380
Номінальний фазний струм I_H , А	7,9	15,1	28,4	69,2	48,2	57,6
Кількість полюсів $2p$	2	4	2	6	2	2
Кількість послідовних витків у фазі w_1	148	132	95	80	72	78
Обмотковий коефіцієнт $k_{об1}$	0,958	0,96	0,957	0,925	0,924	0,898
Розрахункова довжина l_δ , мм	104	116	113	175	160	175
Ефективний повітряний проміжок δ' , мм	0,393	0,455	0,936	0,72	1,035	1,13
Коефіцієнт насичення магнітного кола	1,58	1,37	1,28	1,3	1,3	1,23

Задача 4.13.

Знайти у відносних одиницях індуктивний опір розсіювання обмотки статора синхронного генератора типу СГД-16-84-6УХЛ4, якщо відомі наступні дані: корисна потужність $P_2=3500$ кВт, напруга мережі $U_H=10500$ В, частота мережі живлення $f=50$ Гц, $\cos\varphi=0,8$, частота обертання $n=1000$ об/хв, ККД $\eta=0,959$, кількість витків обмотки статора $W_1=114$, провідність лобової частини $\lambda_L=0,44$, диференціальна провідність $\lambda_d=0,356$, пазова провідність $\lambda_n=1,667$, розрахункова довжина генератора $L_\sigma=0,79$ м, базисний опір $Z_\sigma=23,3$ Ом, кількість пазів на полюс і фазу $q=3$.

Задача 4.14.

Знайти у відносних одиницях індуктивний опір розсіювання обмотки статора синхронного двигуна типу СДН, якщо відомі наступні дані: корисна потужність $P_2=800$ кВт, номінальна напруга $U_H=6000$ В, частота мережі живлення $f=50$ Гц, $\cos\varphi=0,9$, номінальна частота обертання $n_H=250$ об/хв, ККД $\eta=94\%$, кількість послідовних витків у фазі $W_1=384$, диференціальна провідність $\lambda_d=0,54$, пазова провідність $\lambda_n=2,2$, провідність по коронкам зубців $\lambda_K=0,18$, провідність лобового розсіювання $\lambda_L=0,5$, розрахункова довжина двигуна $L_\sigma=0,361$ м, базисний опір $Z_\sigma=38$ Ом, кількість пазів на полюс і фазу $q=2$, кількість пар полюсів $p=12$.

Задача 4.15.

Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має номінальну потужність $P_H=250$ кВт, $U_{1нф}=380$ В, $n_1=1000$ об/хв, $I_{1нф}=267$ А, $f_1=50$ Гц. Визначити індуктивний опір розсіювання обмотки статора у відносних одиницях, якщо відомо: форма і розміри паза (рис. 4.1.) у мм, кількість витків у фазі статора $W_1=40$, коефіцієнт

скорочення $\beta=y_1/\tau=0,833$, обмотковий коефіцієнт для статора $K_{об1}=0,926$, кількість пазів на полюс і фазу статора $q=4$, величина повітряного проміжку $\delta=1$ мм, коефіцієнт Картера $K_\delta=1,2$, зубцевий крок статора $t_1=20,5$ мм, розрахункова довжина $L_\sigma=35,5$ см, довжина лобової частини обмотки статора $L_{л1}=38,8$ см, полюсна поділлка $\tau=24,6$ см.

Задача 4.16.

Знайти індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора у відносних одиницях асинхронного двигуна із к.з. ротором, дані якого наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Дані	Варіанти			
	1	2	3	4
Номінальна потужність P_n , кВт	45	110	315	500
Номінальна напруга U_n , В	220/380	220/380	6000	6000
Номінальний струм $I_{лн}$, А	91.4	199.5	38.6	57.1
Кількість полюсів $2p$	10	6	6	4
Частота Гц	50	50	50	50
Зубцевий крок статора t_1 , мм	13.96	16.14	22.5	24.8
Кількість витків у фазі статора W_1	90	38	276	200
Розрахункова довжина статора l_δ , м	0.2	0.275	0.454	0.432
Діаметр розточки D , м	0.4	0.373	0.515	0.474
Зубцевий крок ротора t_2 мм	11.8	14.11	19.2	21.2
Коефіцієнт скорочення обмотки статора K_{y1}	0.8	0.833	0.966	0.951
Кількість пазів на полюс і фазу q	3	4	4	4
Величина повітряного проміжку δ , мм	0.7	0.8	1.1	1.3
Довжина лобової частини обмотки статора $L_{л1}$, м	0.2065	0.3104	0.444	0.567
Коефіцієнт Картера K_δ	1.18	1.22	1.7	1.85
Обмотковий коефіцієнт обмотки статора $K_{об1}$	0.912	0.925	0.925	0.91
Ескіз паза та його розміри дані на рисунку	4.2	4.3	4.4	4.5

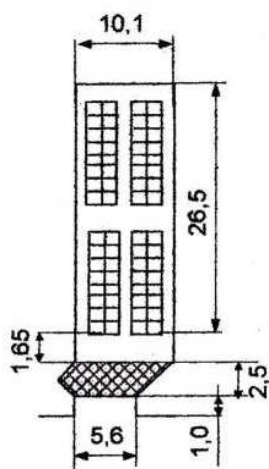


Рисунок 4.1

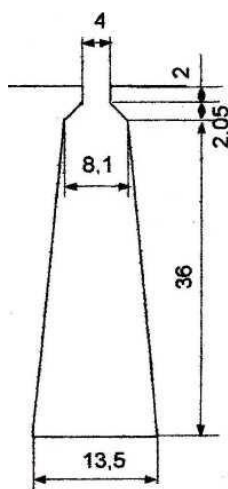


Рисунок 4.2

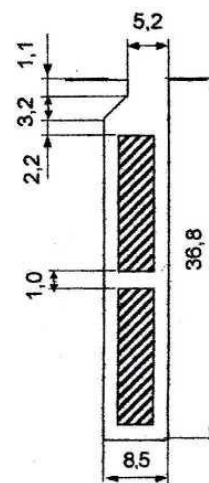


Рисунок 4.3

Задача 4.17.

Визначити індуктивний опір розсіювання обмотки статора у відносних одиницях синхронного генератора типу СГД, який має номінальну потужність $P_n=3500$ кВт,

номінальну напругу $U_H=6300$ В, номінальну частоту обертання $n_H=1000$ об/хв, а також відомо: кількість послідовних витків у фазі обмотки статора $W_1=72$, розрахункова довжина $L_\delta=0,83$ м, коефіцієнт скорочення $\beta=0,833$, кількість пазів статора $Z_1=72$, коефіцієнти: $K_\beta=0,906$ і $K_\beta'=0,87$, величина $\lambda_k=0,28$, коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha=0,7$, кількість пазів на полюс і фазу $q=4$, зубцева поділлка статора $t_1=4,36$ см, розрахункова довжина статора (враховуючи вентиляційні канали) $L_\delta=84,4 \cdot 10^{-2}$ м, довжина лобових частин $L_\pi=57 \cdot 10^{-2}$ м, полюсна поділлка $\tau=52,3 \cdot 10^{-2}$ м, розрахунковий повітряний проміжок $\delta=0,8 \cdot 10^{-2}$ м, коефіцієнт Картера $K_\delta=1,2$. Ескіз паза та його розміри наведені на рис. 4.6.

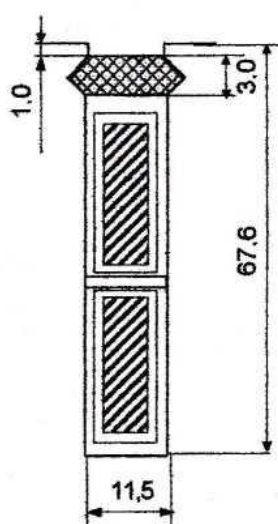


Рисунок 4.4

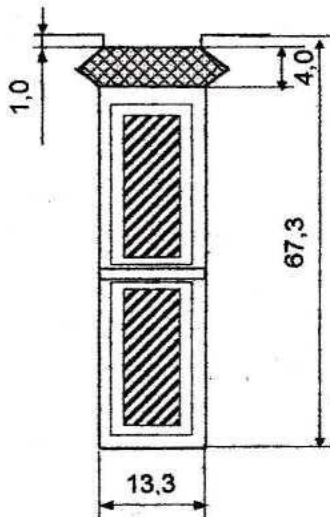


Рисунок 4.5

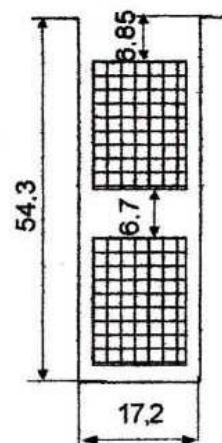


Рисунок 4.6

Задача 4.18.

Знайти індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора у відносних одиницях асинхронного двигуна із к.з. ротором, дані якого наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Дані		Варіанти			
		1	2	3	4
Номінальна потужність P_H , кВт		11	18,5	132	500
Номінальна напруга U_H , В		220/380	220/380	380/660	6000
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$		0.75	0.88	0.9	0.92
кількість пар полюсів p		4	2	2	2
Частота f_1 , Гц		50	50	50	50
ККД		0.87	0.895	0.93	0.947
Розрахункова довжина l_δ , м		0.207	0.145	0.295	0.432
Кількість зубців ротора Z_2		44	34	86	70
Зубцевий крок ротора t_2 , мм		14	17	16	21,2
Середній діаметр к.з. кільця $D_{кр}$, м		0.164	0.133	0.387	0.406
Розміри к.з. кільця;	a , мм	32.2	5.1	5.1	26.9
	b , мм	14	14.8	15	65.2
Переріз стрижня q , мм ²		174.3	230.4	177.2	251
Величина повітряного проміжку δ , мм		0.45	0.5	0.9	1.3
Кількість послідовних витків у фазі статора W_1		120	104	72	200
Коефіцієнт Картера K_δ		1.22	1.22	1.21	1.85

Обмотковий коефіцієнт обмотки статора $K_{об1}$	0.966	0.958	0.902	0.91
Ескіз паза ротора та його розміри в мм дані на рисунку	4.7	4.8	4.9	4.10

Задача 4.19.

Визначити у відносних одиницях індуктивний опір розсіювання ротора трифазного асинхронного двигуна з к.з. ротором. Двигун має: $P_n=250$ кВт, $U_{нф}=380$ В, $I_{нф}=268$ А, $n_1=1000$ об/хв, $f_1=50$ Гц. Розміри паза наведені на рис. 4.11 у мм. Додатково відомо; кількість витків у фазі обмотки статора $W_1=40$, обмотковий коефіцієнт для статора $K_{об1}=0,926$, кількість зубців ротора $Z_2=82$, величина повітряного проміжку $\delta=1$ мм, коефіцієнт Картера $K_\delta=1,2$, зубцева поділка ротора $t_2=17,9$ мм. Розміри к.з. кільця, що прилягає до пакета сталі ротора, $a_{кл} \times b_{кл}=(15 \times 40)$ мм, середній діаметр к.з. кільця $D_{кл.ср}=42,8$ см, довжина статора та ротора $L_1=L_2=260$ мм.

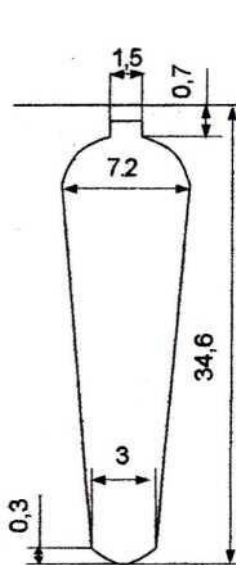


Рисунок 4.7

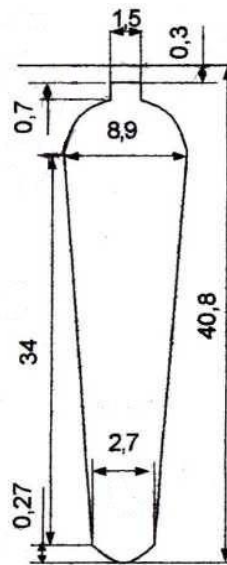


Рисунок 4.8

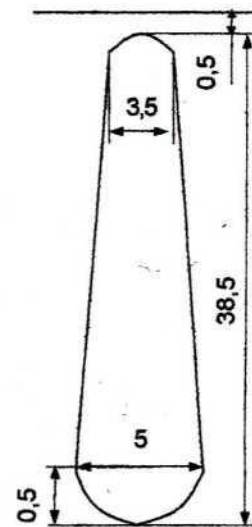


Рисунок 4.9

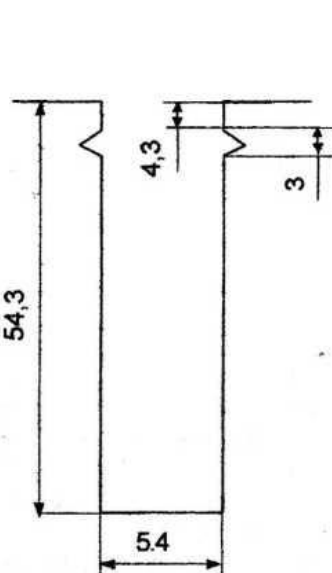


Рисунок 4.10

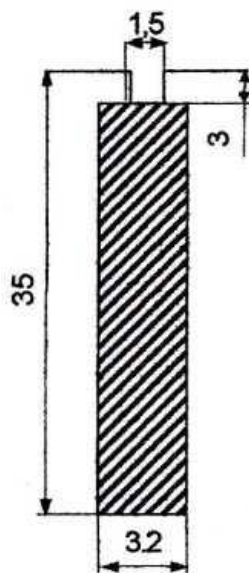


Рисунок 4.11

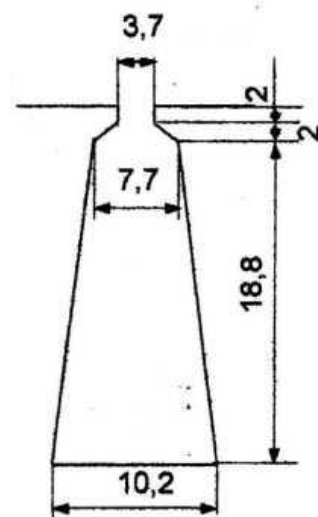


Рисунок 4.12

Задача 4.20.

Визначити у відносних одиницях індуктивний опір розсіювання обмотки статора асинхронного двигуна з к.з. ротором, у якого корисна потужність $P_2=15$ кВт, частота

обертання $n_1=1500$ об/хв, номінальна напруга $U_H=220/380$ В, коефіцієнт потужності $\cos\varphi=0,83$, ККД $\eta=89\%$, висота обертання $h=160$ мм, кількість зубців статора $Z_1=48$, зубцева поділка $t_1=12,1$ мм, кількість витків обмотки статора $W_1=112$, розрахункова довжина двигуна $L_\delta=0,13$ м, довжина лобової частини $L_\Gamma=0,23$ м, коефіцієнт $\xi=0,95$, обмотка одношарова. Геометричні розміри паза статора наведені на рис. 4.12.

Задача 4.21.

Визначити у відносних одиницях індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора асинхронного двигуна з к.з. ротором, дані якого наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_H , кВт	11	2.2	37	18.5	45	400
Номінальна напруга U_H , В	220	220	220	220	220	380
ККД	0.88	0.76	0.9	0.875	0.91	0.945
Коефіцієнт потужності	0.9	0.87	0.89	0.8	0.84	0.91
Кількість полюсів $2p$	2	2	2	8	8	4
Частота мережі f , Гц	50	50	50	50	50	50
Кількість провідників в одному шарі паза u_Γ	21	46	20	38	24	13
Кількість паралельних віток, a	1	1	2	4	4	4
Розрахункова довжина статора l_Γ , мм	130	98	130	220	220	305
Діаметр розточки статора D , мм	130	74	194	220	317	435
Кількість пазів статора Z_1	24	24	36	72	72	60
Кількість пазів ротора Z_2	19	20	28	58	56	50
Величина повітряного проміжку δ , мм	0.6	0.35	0.9	0.45	0.7	1.2
Обмотковий коефіцієнт K_{ob}	0.96	0.958	0.783	0.9	0.9	0.874
Ескіз паза на рисунку	4.13	4.13	4.14	4.14	4.15	4.15
Розміри паза (мм) m	4.0	3.0	4.0	3.7	3.7	6.0
b_1	10.2	6.8	10.5	5.0	7.7	10.7
h	16.5	11.6	28.2	26.5	28.6	44.1
l	0.9	0.5	1.0	1.0	1.1	1.1
b_2	13.4	8.5	14.9	7.2	-	-

Задача 4.22.

Визначити у відносних одиницях індуктивний опір розсіювання фази обмотки ротора асинхронного двигуна з к.з. ротором, дані якого наведені в табл. 4.8.

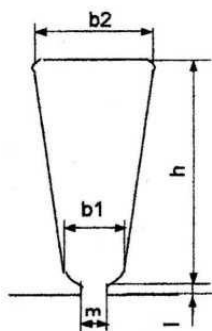


Рисунок 4.13

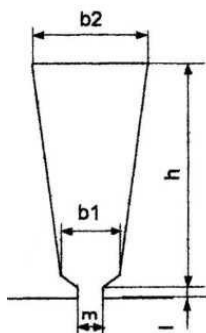


Рисунок 4.14

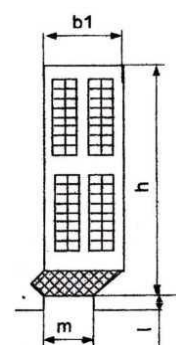


Рисунок 4.15

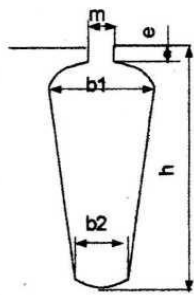


Рисунок 4.16

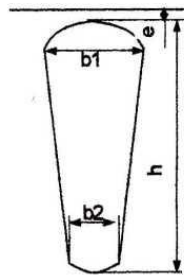


Рисунок 4.17

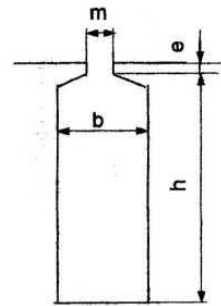


Рисунок 4.18

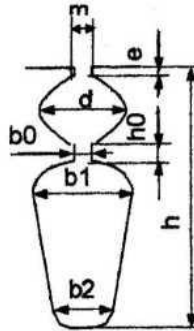


Рисунок 4.19

Таблиця 4.8

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність P_n , кВт	5.5	2.5	45	55	200	55
Номінальна напруга U_n , В	220	220	220	220	220	220
Зовнішній діаметр ротора D_2 , мм	157.3	73.3	192.2	206	468	315.6
Кількість пазів Z_1/Z_2	48/44	24/20	36/28	36/28	72/81	72/56
Кількість полюсів $2p$	8	2	2	2	6	6
Величина повітряного проміжку δ , мм	0.35	0.35	0.9	1.0	1.0	0.7
Розміри к.з. кільця а х b, мм х мм	7.8х 30	14х 15.0	29.4х 34.0	32.0х 33.7	32.0х 36	20х 53
Обмотковий коефіцієнт $K_{об}$	0.966	0.958	0.783	0.783	0.885	0.925
Переріз стрижня q, мм ²	-	-	-	-	-	-
Коефіцієнт потужності	0.74	0.87	0.9	0.92	0.89	0.83
ККД	0.83	0.76	0.91	0.91	0.93	0.912
Кількість провідників в одному шарі паза U_n	21	46	17	26	2	14
Кількість паралельних віток а	1	1	2	2	1	3
Рисунок	4.16	4.17	4.16	4.17	4.18	4.19
Розміри паза (мм): b_1	4.5	6.1	6.9	8.1	6.0	7.6
b_2	1.8	3.3	5.6	4.8	-	3.4
m	1.5	1.0	-	-	1.5	1.5
e	0.75	0.5	1.0	1.0	0.6	1.0
h	22.0	13.6	34.4	35.0	43.3	54
d	-	-	-	-	-	7.2
b_0	-	-	-	-	-	2.0
h_0	-	-	-	-	-	3.0

Задача 4.23.

Визначити індуктивні опори взаємоіндукції та розсіювання для обмотки статора у відносних одиницях асинхронного двигуна з фазним ротором потужністю 14 кВт, напругою $U_n=220/380$ В, фазним струмом $I_{нф}=27,55$ А. З розрахунків відомо: $I_\mu=8,87$ А - намагнічувальний струм, $f_1=50$ Гц - частота, $W_1=84$ - кількість витків, розрахункова довжина $L_\delta=0,18$ м, $2p=4$ - кількість полюсів, $\lambda_{п1}=1,839$ м - коефіцієнт магнітної провідності паза, $\lambda_{л1}=1,034$ - коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання, $\lambda_{д1}=2,062$ - коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання, $Z_1=48$ - кількість пазів статора, $m=3$ - кількість фаз.

Контрольні питання до розділу 4

1. Загальні положення

- 1.1. Що характеризує активний опір обмоток, на що він впливає?
- 1.2. Що характеризує реактивний індуктивний опір взаємоіндукції, і на що він впливає? Як позначається він у трансформаторах, асинхронних та синхронних машинах?
- 1.3. Що характеризує реактивний індуктивний опір розсіювання, і на що він впливає?
- 1.4. Як залежать активні і реактивні опори від лінійного навантаження та індукції у повітряному проміжку? В яких межах знаходяться значення лінійного навантаження та індукції у повітряному проміжку?
- 1.5. Які опори виконують вирішальну роль і на що впливають у сталих та несталих режимах роботи електричних машин?
- 1.6. Навіщо використовується система відносних одиниць? Що приймається за відносну одиницю опору?
- 1.7. Скільки фаз та витків у фазі вважають у роторі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором?

2. Активний опір

- 2.1. Написати загальний вираз для активного опору обмотки. Дати пояснення.
- 2.2. Які кроки повинен зробити проєктант для зміни величини активного опору обмоток?
- 2.3. Який ефект враховується при визначенні активного опору робочої (якірної) обмотки? Які рекомендації щодо провідників висипних, жорстких і стрижневих обмоток?
- 2.4. На основі якого закону і як розраховується ефективний активний опір короткозамкненої обмотки ротора асинхронної машини?
- 2.5. Як впливає активний опір обмотки ротору на ковзання асинхронного двигуна?
- 2.6. При розрахунку механічної характеристики активні опори обмоток статора і ротора постійні чи змінюються, якщо ковзання приймає значення від одиниці до нуля?
- 2.7. В яких межах змінюється активний опір робочих обмоток електричних машин у відносних одиницях?

3. Реактивний індуктивний опір взаємоіндукції

- 3.1. При проєктуванні бажано зробити більше чи менше опір взаємоіндукції? Чи є якісь обмеження?
- 3.2. Як впливає розмір повітряного проміжку на величину опору взаємоіндукції?
- 3.3. Як впливає насичення магнітного кола на величину опору взаємоіндукції?

- 3.4. Чи впливає розмір шлиця (відкриття) пазу на опір взаємоіндукції?
- 3.5. Чи впливає величина обмоткового коефіцієнта на опір взаємоіндукції?
- 3.6. Як впливає величина опору взаємоіндукції на об'єм обмоток збудження машин постійного струму та синхронних?
- 3.7. На які експлуатаційні показники впливає опір взаємоіндукції спроектованих трансформаторів і електричних машин?
- 4. *Реактивний індуктивний опір розсіювання*
 - 4.1. Які складові входять до опору розсіювання? Написати загальний вираз і дати пояснення.
 - 4.2. Які числові значення мають опори розсіювання у відносних одиницях для трансформаторів, асинхронних та синхронних машин?
 - 4.3. Пояснити шлях знаходження магнітних провідностей складових опору розсіювання.
 - 4.4. На які складові опору розсіювання і як впливає ефект витиснення?
 - 4.5. На які складові опори розсіювання і як впливає ефект насичення?
 - 4.6. До яких змін опору розсіювання приводить збільшення чи зменшення розмірів шлиця (відкриття) пазу?
 - 4.7. Як впливає ширина і висота пазу на опір розсіювання, якщо площа пазу постійна?
 - 4.8. Які опори розсіювання використовувати у схемі заміщення асинхронного двигуна при ковзаннях від одиниці до нуля?

5. Вентиляційний розрахунок

Для охолодження електричних машин використовують різні системи. Систему охолодження за допомогою газів відносять до вентиляційної, де найпоширеніше використовують оточуюче повітря.

Головне завдання вентиляції забезпечити над охолоджуючими поверхнями таку швидкість потоку повітря, щоб питомі коефіцієнти передачі з цих поверхонь дозволили отримати припустимі температури нагріву (перевищення) для усіх частин і ділянок конструкції електричної машини.

Таким чином, вентиляційний і тепловий розрахунки взаємопов'язані, гарантуючи машині термічну стійкість.

Загальний вираз витрати повітря в одиницю часу, необхідного для охолодження машини $\text{м}^3/\text{с}$,

$$V = \frac{K_e \cdot \sum p}{C \cdot \Delta\Theta} \quad (5.1)$$

де $\sum p$ – повні витрати потужності в машині, Вт;

K_e – коефіцієнт, який враховує ефективність охолодження;

C – питома теплоємність повітря – $1100 \text{ Дж}/(\text{°C} \cdot \text{м}^3)$;

$\Delta\Theta$ – припустиме підвищення температури між гарячим (вхідним) і холодним (вихідним) повітрями, °C ; $\Delta\Theta = 20\text{°C}$ для машин класу нагрівостійкості «В» і нижче, а для «F» та «H» – $\Delta\Theta = 30\text{°C}$.

Для отримання необхідної витрати повітря треба забезпечити кінетичну енергію в одиниці об'єму, яка дорівнює тиску $\text{Па}/\text{м}^2$,

$$W = \frac{mv^2}{2} = H = \frac{\gamma}{2} v^2 \quad (5.2)$$

де $\gamma = 1,2$ – питома маса оточуючого повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

v – швидкість пересування повітря, $\text{м}/\text{с}$.

Тиск на окремих ділянках повітропроводу визначають

$$H_i = V_i^2 \cdot Z_{ai} \quad (5.3)$$

де Z_{ai} – аеродинамічний опір i -тої ділянки.

Підставивши (5.1) в (5.2), отримаємо вираз для динамічного опору

$$Z_o = \frac{\gamma}{2} \cdot \left(\frac{v}{V}\right)^2 = \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{1}{S_o^2} \quad (5.4)$$

де S_o – площа отвору, через який повітря виходить назовні.

Ділянки повітропроводу мають різний переріз і геометричну форму, тому для кожної ділянки знаходять аеродинамічний опір, використовуючи вираз

$$Z_{ai} = \xi_i \cdot \frac{1}{S_i^2} \cdot \frac{H \cdot c}{i^6} \quad (5.5)$$

де ξ_i – аеродинамічний коефіцієнт i -тої ділянки з відповідними вентиляційними властивостями;

S_i – переріз цієї i -тої ділянки з постійними вентиляційними властивостями.

Вентиляційний розрахунок починають з складання схеми заміщення, проектуванням або вибором вентилятора, а закінчують – визначення швидкості переміщення повітря над поверхнями, які віддають або отримують тепло (втрати).

Для складання схеми заміщення необхідно вказати шляхи пересування повітря від джерела тиску до точки його використання у конкретній конструкції машини з відомими геометричними розмірами. Далі необхідно виділити ділянки з однаковими вентиляційними властивостями (вхід повітря, поворот, різке збільшення або зменшення, тертя в каналі).

Після цього для ділянок повітропроводу з постійними властивостями розраховують аеродинамічні опори по (5.5), які з'єднують між собою згідно з напрямом пересування (шляхів) повітря.

На наступному етапі розрахунку згортають схему заміщення до одного еквівалентного Z_{ae} . При цьому послідовні опори заміняють одним, беручи їх суму (як і електричні опори). При паралельному з'єднанні їх еквівалентне значення знаходять як

$$Z_{e. \ddot{a} \ddot{o}.} = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{1}{Z_1}} + \sqrt{\frac{1}{Z_2}} + \dots + \sqrt{\frac{1}{Z_i}} \right)^2} \quad (5.6)$$

По розрахунковому еквівалентному аеродинамічному опорі усього повітропроводу машини знаходять необхідний тиск вентилятора, використовуючи відомі витрати повітря (5.1) та вираз (5.3).

У подальшому розрахунку необхідно вибрати або спроектувати вентилятор. При проектуванні приймають для відцентрового вентилятора $H_{\max} = \frac{1}{0,75} \cdot H_p$ і $V_{\max} = 2V_p$, де H_p і V_p – розраховані вище тиск і витрати повітря для згорнутої схеми. Після цього необхідно побудувати статичну характеристику спроектованого вентилятора $H^* = f(V^*)$, де у відносних одиницях $H_{\max}^* = 1$ і $V_{\max}^* = 1$.

Для побудови характеристики вентилятора використовують рівняння

$$H^* = 1 - \left(\frac{V}{V_{\max}} \right)^2 = 1 - (V^*)^2 \quad (5.7)$$

Для перевірки можливості розрахункових H_p і V_p будують статичну характеристику по (5.7), а також аеродинамічну характеристику повітропроводу

$$H_n = Z_{ae} \cdot V_n^2 \quad (5.8)$$

де Z_{ae} – повний аеродинамічний опір повітропроводу, величина постійна;

V_n – величина, яку задають.

На рис. 5.1 побудовані статична характеристика відцентрового вентилятора у відносних одиницях (крива 1) та повітря проводу (крива 2). Точка їх перетину Р дає робочі (номінальні) значення тиску $H_{ном}^*$ і витрати повітря $V_{ном}^*$, які забезпечить вентилятор.

Якщо ця точка дає показники $H_{i \ddot{i}}$ і $V_{i \ddot{i}}$ не менше розрахованих по схемі замі-

щенні і (5.1), лежить у зоні високого ККД (крива 3), то ці значення приймають. Надалі їх використовують при розгортанні схеми заміщення і визначенні швидкостей повітря над конкретними поверхнями. Ці значення передають у тепловий розрахунок з метою отримати питомі коефіцієнти теплопередачі (чи прийому тепла) з відповідних поверхонь.

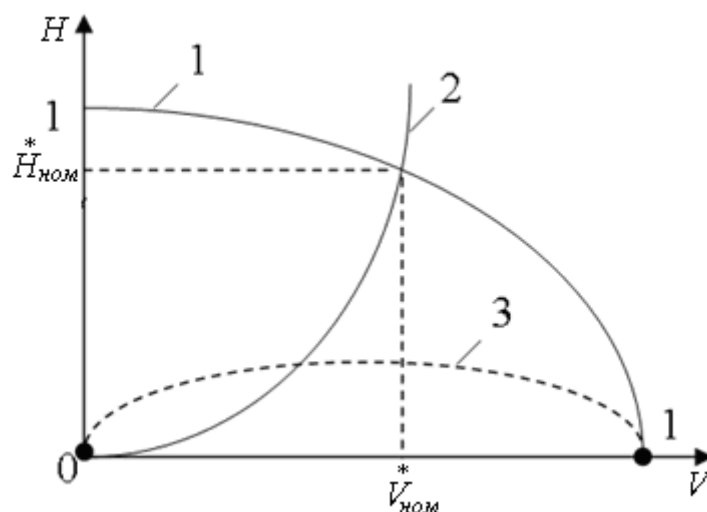


Рисунок 5.1

Задача 5.1.

Визначити витрати повітря, необхідні для відведення втрат, які мають місце в асинхронному двигуні зі ступенем захисту IP44. Вихідні дані наведені у табл. 5.1. Питома теплоємність охолоджуючого повітря $c = 1100 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. Врахувати зміну умов охолодження вздовж поверхні двигуна.

Таблиця 5.1

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність P, кВт	110	1	2,2	132	14	0,18
Висота осі обертання, мм	250	160	-	-	-	-
Число полюсів 2p	4	-	6	-	-	6
ККД	0,92	0,87	0,81	0,93	0,89	0,9
n, об/хв	-	750	-	1500	1500	-
Da, мм	-	-	0,168	0,590	0,272	0,1
Клас нагрівостійкості	F	F	F	F	F	F
Номінальна напруга, В	380/660	220/380	220/380	220/380	220/380	220/380

Задача 5.2.

Визначити втрати тиску (втрати напору) при русі повітря зі швидкістю $v = 5 \text{ м/с}$. Характеристика перерізів ділянок повітропроводу задана у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Найменування перерізу	Переріз, м ²	Співвідношення перерізів	Додаткові відомості
Поворот струменю	0.36	-	$\alpha = 90^\circ$
Звуження	0.08	0.5	-

Таблиця 5.2

Найменування перерізу	Переріз, м2	Співвідношення перерізів	Додаткові відомості
Вхід в канал	$7.8 \cdot 10^{-5}$	1.8	
Прохід по каналу	$8.0 \cdot 10^{-5}$	-	$ k /dk=20$
Вихід з каналу	0.01	2	-

Задача 5.3.

Знайти еквівалентний аеродинамічний опір повітропроводу, схема заміщення якого наведена на рис. 5.2, якщо відомо: $Z_1=15 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $Z_2=16 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $Z_3=25 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $Z_4=10 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

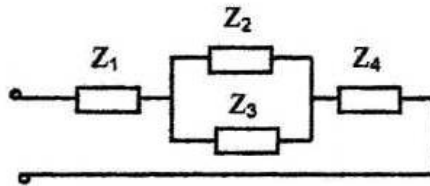


Рисунок 5.2

Задача 5.4.

Визначити напір (тиск), який повинен розвинути вентилятор асинхронного двигуна, дані якого наведені у табл. 5.3. Питомо теплоємність повітря $c=1100 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Таблиця 5.3

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність P , кВт	14	110	15	55	14	25
Висота осі обертання h , мм	-	315	160	-		-
Кількість полюсів $2p$	-	6	4	10	-	8
ККД	-	0,941	0,91	0,919	-	0,9
$\sum P$, Вт	1235	-	-	-	1230	-
Z_c ($\text{Па} \cdot \text{с}^2$)/ м^6	930	244,27	660	5730	9265	1052
$\Delta\theta_v$, $^\circ\text{C}$	30	20	30	30	20	30
Ступінь захисту	IP23	IP44	IP44	IP44	IP23	IP44

Задача 5.5.

Асинхронний двигун з к.з. ротором номінальною потужністю P , кількістю полюсів $2p$, ККД, висотою осі обертання h має вентиляційну схему заміщення, яка складається із послідовно з'єднаних аеродинамічних опорів: Z_1 - опір входу; Z_2 - опір на повороті повітряного потоку; Z_3 - опір входу в міжреберний простір; Z_4 - опір тертя об стінки каналів; Z_5 - опір виходу у навколишнє середовище (динамічний). Знайти необхідний для охолодження напір повітря, який створюється вентилятором. Клас нагрівостійкості F . Вихідні дані у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність P , кВт	15	4	18,5	110	132	45
Номінальна напруга, В	220/380	220/380	220/380	220/380	380/660	220/380

Таблиця 5.4

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Висота осі обертання, мм	160	100	180	315	315	200
Кількість полюсів 2р	4	4	4	6	8	12
ККД	0,9	0,88	0,92	0,941	0,93	0,9
$Z_1, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	24,4	131,57	700	127,418	99	320
$Z_2, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	56,9	307	2330	121,8	30	90
$Z_3, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	73,9	55,5	480	55,4	97,2	210
$Z_4, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	142,3	33,4	588	3081	67,2	123,6
$Z_5, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	360,8	272,1	2400	121,12	99	198,5
Ступінь захисту	IP44	IP23	IP23	IP44	IP23	IP44

Задача 5.6.

Втрати тиску (падіння напору) в охолоджуючому каналі становлять $H=80$ Па, діаметр каналу 1 см, а аеродинамічний опір каналу становить $1.2 \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$. Визначити швидкість переміщення охолоджуючого агента у каналі.

Задача 5.7.

На рис. 5.3 наведена вентиляційна схема заміщення, у якій $Z_1=1 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; $Z_2=7.5 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ і $Z_3=20.8 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$. Знайти швидкість охолоджуючого повітря на кожній ділянці опорів, якщо робочий тиск, створений вентилятором, складає 252 Па, а витрата повітря - $8 \text{ м}^3/\text{с}$. Додатково відомо відповідно перерізи ділянок: $S_1=0.55 \text{ м}^2$, $S_2=0.2 \text{ м}^2$ і $S_3=0.1 \text{ м}^2$.

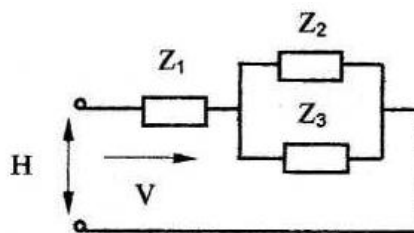


Рисунок 5.3

Задача 5.8.

Визначити робочі значення тиску (напору) та витрати повітря центробіжного вентилятора з радіальними лопатками, який має $H_{\max}=4.27$ Па і $V_{\max}=0.4 \text{ м}^3/\text{с}$ і працює на повітропроводі з еквівалентним аеродинамічним опором $Z_3=20 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Задача 5.9.

Розрахувати розміри центробіжного вентилятора з радіальними лопатками для двигуна, дані якого наведені у табл. 5.5. З вентиляційного розрахунку відомо: Z - аеродинамічний опір усієї машини; V - необхідна для охолодження витрата повітря; H - необхідний напір вентилятора. Визначити втрати потужності на вентиляцію.

Таблиця 5.5.

Дані	Варіанти		
	1	2	3
Потужність P , кВт	30	22	45
n , об/хв	3000	1500	500
D_a , м	0.26	0.324	0.5

Таблиця 5.5.

Дані	Варіанти		
	1	2	3
ККД	0.89	0.941	0.91
$Z, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	1000	1404	1234
$V, \text{м}^3/\text{с}$	0.23	0.05	0.143
$H, \text{Па}$	53	140	83.79
η_v	0.25	0.2	0.25

Задача 5.10.

Вентилятор створює максимальний тиск $H_{\max}$ і максимальну витрату повітря $V_{\max}$. Знайти робочі значення тиску і витрати повітря вентилятора, якщо аеродинамічний опір цього вентиляційного кола Z . Вихідні дані наведені у табл. 5.6.

Таблиця 5.6.

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
$Z, (\text{Па} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^6$	850	1100	1270	1400	1200	1470
$V, \text{м}^3/\text{с}$	0,37	0,52	0,61	0,70	0,60	0,65
$H, \text{Па}$	39,0	96,7	151,0	220,0	120,0	190,0

Контрольні питання до розділу 5**1. Загальні положення.**

- 1.1. Яка мета вентиляційних розрахунків?
- 1.2. Класифікація способів вентиляції.
- 1.3. Навести приклади впливу систем вентиляції на конструкцію електричних машин.
- 1.4. Які типи вентиляторів існують? Що для них характерно?
- 1.5. Як позначають способи вентиляції?

2. Теоретичні положення.

- 2.1. Як знайти витрати повітря, необхідних для охолодження електричної машини?
- 2.2. Який зв'язок існує між тиском (напором), витратами повітря та аеродинамічним опором?
- 2.3. Вкажіть види ділянок повітропроводу, де має місце втрати тиску (напору).
- 2.4. За допомогою чого враховується специфіка ділянок повітропроводу? Як визначається аеродинамічні опори цих ділянок?
- 2.5. Що характеризує динамічний опір?

3. Вентиляційний розрахунок.

- 3.1. Послідовність вентиляційного розрахунку.
- 3.2. Як скласти вентиляційну схему заміщення?
- 3.3. Правила складання послідовно і паралельно з'єднаних аеродинамічних опорів.
- 3.4. Вигляд статичної характеристики центробіжного вентилятора. Дати пояснення точкам: $H=H_{\max}$ та $V=0$ і $H=0$ та $V=V_{\max}$. Як змоделювати ці точки?
- 3.5. Як знайти робочі значення H і V , якщо відома статична характеристика вентилятора?

- 3.6. Як знайти швидкість переміщення повітря над охолоджуючою поверхнею?
- 3.7. Написати вираз для вентиляційних втрат.

6. Тепловий розрахунок

Тепловий розрахунок виконують при повністю відомих розмірах конструкції електричної машини.

Мета теплового розрахунку визначити і забезпечити припустимі стандартні значення (перевищення) температур окремих частин конструкції електричної машини.

Відвід тепла (втрат) з машин відбувається способами:

- конвекцією;
- теплопровідністю;
- випромінюванням.

В електричних машинах загального призначення використовують штучне переміщення повітря, тому при теплових розрахунках враховують теплопередачі тільки теплопровідністю та конвекцією.

Кількість тепла (втрат потужності) при теплопередачі теплопровідності визначають:

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta\Theta}{L} \quad (6.1)$$

де λ – питомий коефіцієнт теплопередачі теплопровідністю, Вт/(м·°C);

S – площа перерізу, через який проходить тепло (тепловий потік), м²;

$\Delta\Theta$ – різниця (перепад) температури на відстані довжиною L , °C;

L – довжина ділянки з однаковими тепловими властивостями, поздовж якого проходить тепловий потік.

Кількість тепла (втрат потужності) при теплопередачі з поверхні:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta \quad (6.2)$$

де α – питомий коефіцієнт теплопередачі (віддачі) з поверхні, Вт/(м²·°C);

S – поверхня, з якої відводиться (або підводиться) тепло (втрати потужності), м²;

$\Delta\Theta$ – різниця (перепад) температури між поверхнею і оточуючим її повітрям.

При визначенні перевищень температур у сталих режимах окремих частинах машин відносно оточуючого повітря, температуру якого приймають згідно зі стандартом 40 °C для поміркованої кліматичної зони, використовують схеми заміщення.

Для створення теплової схеми заміщення використовують аналогії з електричними величинами електричних кіл:

$$\begin{array}{lll} U \text{ (напруга)} & \rightarrow & \Delta\theta \text{ (температура, } ^\circ\text{C)}; \\ I \text{ (струм)} & \rightarrow & \Delta Q \text{ (тепловий потік, Вт)}; \\ R_e \text{ (опір)} & \rightarrow & R_T \text{ (тепловий опір, } ^\circ\text{C/Вт)}. \end{array} \quad (6.3)$$

У такій тепловій схемі заміщення діють закони електротехніки, а згідно з законом Ома теплові опори мають два види:

- для теплопередачі теплопровідністю

$$R_\lambda = L/(\lambda \cdot S) \quad (6.4)$$

- для теплопередачі з поверхонь

$$R_\alpha = 1/(\alpha \cdot S) \quad (6.5)$$

Джерела тепла (втрат) у тепловій схемі заміщення концентрують в тих точках конструкції, де найбільші нагріви. Ці джерела у подальшому розглядають по аналогії з електричним колом – джерелами струму.

Створення теплової схеми заміщення починають з розміщення джерел тепла (втрат) у відповідних частинах конструкції та визначення шляхів тепловідводу, тобто напрямку теплових потоків. Далі визначають ділянки з однаковими теплофізичними властивостями (способом передачі і розмірами), і для кожної ділянки знаходять теплові опори по (6.4) або (6.5). Теплові опори послідовно з'єднують згідно напрямку переміщення теплового потоку.

Розрахунок теплових опорів при теплопередачі теплопровідністю не викликає труднощів, тому що з геометрії машини можна розрахувати площину перерізу ділянки, а питомі коефіцієнти теплопровідності достатньо точно подають у відповідній таблиці [3,4,6].

Складніше розрахувати тепловий опір при теплопередачі з поверхні. Питомий коефіцієнт теплопередачі з поверхні α залежить від швидкості переміщення повітря, яку, до речі, визначають у вентиляційному розрахунку. Цей коефіцієнт залежить також від характеру руху та теплофізичних властивостей охолоджуючого повітря.

Визначення питомого коефіцієнта теплопередачі з поверхні можна за допомогою [3,4,5,6]:

- безрозмірних коефіцієнтів подібності (Нусельта, Рейнольдса і Прандтля);
- аналітичних залежностей для конкретних випадків;
- графічних залежностей для конкретних конструкцій, отриманих дослідними шляхами.

Приклади знаходження питомих коефіцієнтів охолодження поверхонь, складання та вигляд теплових схем заміщення наведені у [6].

У тепловій схемі невідомими є перевищення температур у вузлах, які нумерують, та величини теплових потоків. Чисельні значення теплових опорів розраховані та відомі.

Використовуючи властивість, що суми теплових потоків у вузлі дорівнює нулю, а також закон Ома для окремих ділянок схеми заміщення, складають систему рівнянь, яку можна розв'язати за допомогою метода Гауса чи методом вузлових потенціалів.

Результатом розв'язання є числові величини перевищення температур окремих вузлів (тобто частин конструкції машини) над оточуючим повітрям. Ці перевищення не повинні бути більшими припустимих стандартів.

У разі перевищення температур більш припустимих треба:

- збільшенням коефіцієнтів теплопередачі з поверхонь, зробивши більші швидкості охолоджуючого повітря, що потребує відповідне перерахування вентиляційного розрахунку;
- переконструювати машину, зменшивши величину теплового фактору ($A \cdot j$) та збільшивши площу охолодження;
- по можливості взяти товщину ізоляцій провідників і пазової менших розмірів;
- змінити клас нагрівостійкості у бік збільшення.

Якщо отримані перевищення температур значно нижче, ніж припустимі, то треба використати вищенаведені рекомендації у зворотному напрямку.

Розраховані перевищення температур обмоток (як найбільш важливі) є усереднені. Реально в обмотці є місця, де температура більш (так звані «місцеві перегрів»). В зв'язку з цим припустимі температури перевищення відносно оточуючого

повітря (40°C) для обмоток знижують: 10°C – для класу нагрівостійкості «В» і 15°C – для «F».

Задача 6.1.

Знайти кількість тепла в одиницю часу, яке проходить крізь тверде тіло, яке має площу $S=0.003\text{ м}^2$, товщу $= 0.015\text{ м}$, різницю температур на краях $\Delta\theta=15^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнт теплопровідності $\lambda=30\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Задача 6.2.

Яка кількість тепла відводиться з поверхні $S=0.05\text{ м}^2$, якщо відомий питомий коефіцієнт передачі з поверхні $\alpha=40\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ і різниця температур між поверхнею та охолоджуючим повітрям $\theta =10^{\circ}\text{C}$?

Задача 6.3.

Визначити перепад температури у плиті гетинаксу товщиною d , якщо перпендикулярно до її поверхні має місце тепловий потік густиною q . Вважати коефіцієнт теплопровідності гетинаксу $0,3\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$. Вихідні дані наведені у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
$q, \text{ Вт}/\text{м}$	800	1000	1100	1200	1400	900
$d, \text{ см}$	0,5	1	1,2	1,5	2	0,7

Задача 6.4.

Поверхня площиною S охолоджується примусово повітрям, яке відводить в оточуюче середовище кількість тепла Q . Розрахувати питомий коефіцієнт тепловіддачі з цієї поверхні, якщо середня різниця температури між поверхнею і охолоджуючим повітрям $\Delta\theta$. Необхідні дані наведені у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
$S, \text{ м}^2$	1,0	0,8	0,4	0,3	0,1	0,2
$Q, \text{ кВт}$	0,50	0,60	0,15	0,15	0,10	0,15
$\Delta\theta, ^{\circ}\text{C}$	10	15	7,5	10	20	15

Задача 6.5.

Визначити коефіцієнт питомої тепловіддачі зовнішньої поверхні гладкого корпусу двигуна, який обдувається повітряним потоком. Коефіцієнт тепловіддачі визначати по критеріальному рівнянню теплообміну, використовуючи критерій Рейнольдса та дані табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Дані	Варіанти				
	1	2	3	4	5
Довжина зовнішньої поверхні, м	0,43	0,5	0,64	0,43	0,55
Швидкість повітря, м/с	18,5	21,5	25,5	20,2	21,5
Кінематична в'язкість ν , $10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$	15,68	15,68	16,6	15,68	16,6
Коефіцієнт теплопровідності повітря λ , $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252

Задача 6.6.

Оцінити значення питомого коефіцієнта теплопередачі стінки аксіального каналу ротора асинхронного двигуна, використовуючи критеріальні рівняння теплообміну та дані табл. 6.4. Характер руху повітря визначити по критерію Рейнольдса.

Таблиця 6.4

Дані	Варіанти				
	1	2	3	4	5
Діаметр каналу, м	0,02	0,02	0,025	0,025	0,025
Швидкість повітря, м/с	9,5	12,5	15,0	25,0	15,5
Кінематична в'язкість ν , 10^{-6} м ² /с	17,52	18,47	17,52	17,52	18,47
Температуропровідність α , 10^{-6} м ² /с	23,94	25,35	23,94	23,94	25,35
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/м·°С	0,0266	0,0272	0,0266	0,0266	0,0272

Задача 6.7.

Визначити коефіцієнт тепловіддачі з поверхні стінки, яка обдувається вздовж повітрям зі швидкістю ν при температурі t при ламінарному та турбулентному рухах охолоджуючого агента в'язкістю $\nu=1,568 \cdot 10^{-5}$ м²/с, довжина поверхні, яка охолоджується L . Дані для розрахунків наведені у табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Швидкість ν , м/с	4	5	7	10	15	20
Температура t , °С	20	25	27	30	15	22
Довжина L , м	0,25	0,30	0,35	0,20	0,40	0,45

Задача 6.8.

Визначити питомий коефіцієнт теплопередачі з поверхні каналу діаметром d , якщо швидкість охолоджуючого агента у ньому ν при температурі t ; параметри повітря: кінематична в'язкість $\nu=1,568 \cdot 10^{-5}$ м²/с, теплопровідність - $\lambda=0,0252$ Вт/м·°С, питома теплоємність - $C_v=1015$ Дж/(кг·°С), питома густина повітря - $\rho=1,164$ кг/м³; рух - ламінарний; вихідні дані у табл. 6.6.

Таблиця 6.6

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Швидкість ν , м/с	5	10	15	12	8	17
Температура t , °С	20	15	17	25	30	35
Діаметр d , м	0.005	0.004	0.006	0.007	0.008	0.01

Задача 6.9.

Визначити питомий коефіцієнт тепловіддачі з поверхні якоря та котушок збудження машин постійного струму при обдуті повітрям зі швидкістю ν , температурі t , окружній швидкості якоря ν_a , а також колектора при окружній швидкості колектора V_k , та нормальних умовах вентиляції ($\kappa=0,7$). Вихідні дані у табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
v , м/с	5	7	10	15	12	20
$v_{в}$, м/с	9	12	15	6	18	9
$v_{к}$, м/с	1,2	1,5	1,8	0,9	2,0	1,5
t , °C	20	15	25	20	18	22

Задача 6.10.

Електрична машина має форму гладкого паралелепіпеда з висотою h , шириною b , довжиною L (табл. 6.8). Яка величина втрат відводиться з машини в навколишнє середовище, якщо різниця температур між поверхнею машини та навколишнім середовищем $\Delta\theta$ для випадків:

- машина знаходиться в спокійному повітрі;
- машина обдувається, швидкість руху повітря v .

Порівняти величини втрат, які відводяться, для обох випадків.

Таблиця 6.8

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Висота h , м	0.8	0.04	0.06	0.5	0.1	0.7
Ширина b , м	0.8	0.1	0.04	0.7	0.2	1.0
Довжина L , м	0.6	0.8	0.05	1.0	0.2	1.3
Перепад $\Delta\theta$, °C	10	20	35	25	15	30
Швидкість v , м/с	15	20	25	10	15	20

Задача 6.11.

Визначити величину втрат, які відводяться з поверхні колектору при посиленому зовнішньому обдуті поверхні та наявності вентиляційних каналів у колекторній втулці, якщо відомо із табл. 6.9:

- D_k - діаметр колектору зовнішній;
- L_k - довжина колектору;
- v_k - лінійна швидкість на поверхні колектору.

Різниця температур між поверхнею колектору та навколишнім повітрям дорівнює 10°C. Яка величина втрат буде відводитися при нормальних умовах обдуву? При цьому вважати розміри, лінійну швидкість та перепад температури такими, як і у першому випадку. Зробити висновки.

Таблиця 6.9.

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
D_k , м	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
L_k , м	0,4	0,3	0,6	0,5	0,7	0,8
v_k , м/с	9	8	6	10	12	15

Задача 6.12.

Відстань між серединою пакету магнітопроводу статора і серединою провідників лобової частини дорівнює 0.45 м, у пазу розташовано 8 провідників, перетин одного провідника 16 мм². Визначити тепловий опір провідників на згаданій відстані.

Задача 6.13.

Пакет з електротехнічної сталі 2211 набраний з листів товщиною 0.5 мм і має розміри: товщину 0.08мм; ширину - 0.2 м і висоту - 0.4 м. Визначити тепловий опір від центру пакету вздовж та поперек листів сталі, якщо коефіцієнт заповнення пакету сталлю дорівнює 0.95.

Задача 6.14.

Знайти числове значення результуючої питомої теплопровідності пакета поперек листів електротехнічної сталі товщиною Δ , якщо відомо: коефіцієнт теплопровідності сталі дорівнює 20 м/(Вт·°C); листи сталі ізолювані папером, який має товщину Δ_6 і коефіцієнт теплопровідності 0,15 Вт/(м·°C); пакет занурений у трансформаторне масло, при цьому, навіть при нормальному тиску пресування пакета, між наклеєним ізолюючим папером й суміжним листом сталі є плівка масла товщиною δ ; коефіцієнт теплопровідності масла дорівнює 0,16 Вт/(м·°C). Вихідні дані наведені у табл. 6.10.

Таблиця 6.10

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Δ , мм	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Δ_6 , мк	20	20	30	30	40	40
δ , мк	1	1	2	2	3	3

Задача 6.15.

Який тепловий опір має поверхня аксіального каналу довжиною 0.2 м та діаметром 0.01 м, якщо питомий коефіцієнт теплопередачі з поверхні дорівнює 70 Вт/(м²·°C)?

Задача 6.16.

Турбогенератор потужністю 30 МВт має статор з радіальними охолоджуючими каналами. Далі відомо: кількість каналів - 50; ширина каналу - 0,01 м; периметр стрижня обмотки, який перетинає канал, дорівнює 0.378 м; кількість зубців на статорі - 54. Визначити сумарний тепловий опір поверхні стрижнів, які знаходяться у каналі, якщо питомий коефіцієнт теплопередачі з поверхні дорівнює 65 Вт/(м²·°C).

Задача 6.17.

Знайти еквівалентний тепловий опір з'єднання, поданого на рис. 6.1, якщо відомі: $R_1=0.05^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_2=0.04^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_3=0.035^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_4=0.07^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_5=0.03^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Яка кількість тепла відводиться при різниці температур між точками 1 и 2 - 20 °C?

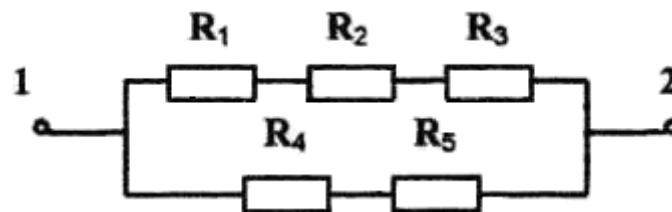


Рисунок 6.1

Задача 6.18.

На рис. 6.2 дана теплова схема заміщення. Визначити різницю температур між точками 1 і 2, 2 і 3, 1 і 3, якщо потужність джерела $P=500$ Вт, $R_1=0.06^\circ\text{C}/\text{Вт}$ і $R_2=0.01^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

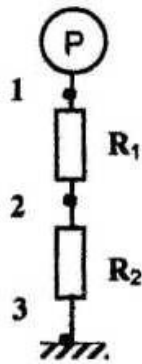


Рисунок 6.2

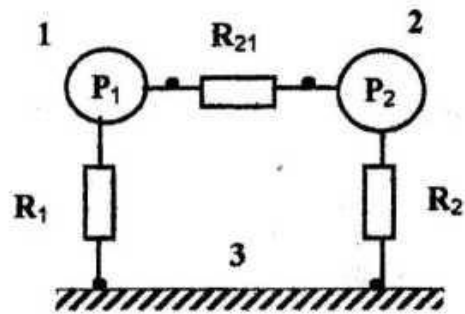


Рисунок 6.3

Задача 6.19.

Визначити різницю температур між точками 1 і 3, 2 і 3, 1 і 2 у тепловій схемі заміщення на рис. 6.3, якщо відомо $P_1=1200\text{Вт}$; $P_2=400\text{Вт}$; $R_1=1.2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/Вт}$; $R_2=5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/Вт}$; $R_{12}=2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/Вт}$. Показати напрямки теплових потоків.

Задача 6.20.

Визначити перегрів відносно температури навколишнього середовища лобових частин обмотки, пазових частин обмотки, сталі магнітопровода статора для асинхронного двигуна з фазним ротором потужністю P_n , якщо відомі наступні дані: втрати в пазовій частині $P_{п1}$, втрати в лобових частинах $P_{л1}$, втрати в сталі $P_{ст1}$, тепловий опір лобової частини $R_{л1}$, тепловий опір пазової ізоляції $R_{из1}$, тепловий опір металу усіх проводів обмотки $R_{пр1}=0,024 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, тепловий опір магнітопровода статора $R_{ст1}=0,09 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, теплова схема заміщення дана на рис. 6.4. Вихідні дані наведені у табл. 6.11.

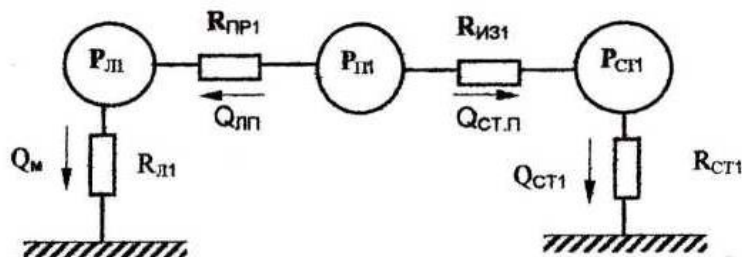


Рисунок 6.4

Таблица 6.11

Дані	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність P , кВт	14	110	15	55	14	25
$P_{п1}$, Вт	315.5	2315.7	460	1250	330	580
$P_{ст1}$, Вт	188.3	1560.8	192	600	178	342
$R_{л1}$, $10^{-3} \cdot ^\circ\text{C/Вт}$	0.9	0.94	0.91	0.92	0.89	0.9
$R_{из1}$, $10^{-3} \cdot ^\circ\text{C/Вт}$	0.24	0.2	0.19	0.22	0.32	0.28
$P_{л1}$, Вт	418.3	3902	460	1730	435	965

Задача 6.21.

Навести теплову схему заміщення для серійних асинхронних двигунів з к.з. ротором загального призначення з висотою осі обертання до 250 мм і ступенем захисту IP44, дати пояснення і скласти для неї систему рівнянь у матричній формі запису, використовуючи метод вузлових потенціалів.

Задача 6.22.

Використовуючи тепловий чинник (фактор) розрахувати перепад температури у пазовій ізоляції обмотки статора синхронного двигуна потужністю 560 кВт, який має: лінійне навантаження $A=4.2 \cdot 10^4$ А/м; густину струму у провідниках обмотки якоря $j_1=5.6$ А/мм²; діаметр розточки статора $D=1.05$ м; кількість зубців – $Z_1=108$; висоту паза $h_{\text{п}}=60$ мм; висоту клина паза $h_{\text{к}}=5.5$ мм, ширину паза $B_{\text{п}}=12.2$ мм; товщину пазової ізоляції на один бік $\Delta_{\text{из}}=2.55$ мм; клас нагрівостійкості ізоляції - F.

Контрольні питання до розділу 6

1. *Загальні положення*
 - 1.1. Що викликає нагрівання електричної машини?
 - 1.2. Якими способами можлива теплопередача?
 - 1.3. За допомогою чого оцінюють температуру нагрівання електричних машин?
 - 1.4. Дайте перелік факторів, які впливають на нагрівання і повинні враховуватись при проектуванні.
 - 1.5. Яка мета теплових розрахунків електричних машин?
 - 1.6. Що обумовлює клас нагрівостійкості ізоляції?
 - 1.7. Які класи нагрівостійкості мають сучасні асинхронні двигуни?
2. *Теплопровідність*
 - 2.1. Умови при яких теплопередача відбувається теплопровідністю?
 - 2.2. Загальний вираз кількості тепла при передачі теплопровідністю.
 - 2.3. Числові значення питомих коефіцієнтів теплопровідності для міді та алюмінію.
 - 2.4. Числові значення питомих коефіцієнтів теплопровідності вздовж та поперек листів електротехнічних сталей.
 - 2.5. Числові значення питомих коефіцієнтів теплопровідності ізоляції, водороду і повітря.
 - 2.6. Як впливає питомий коефіцієнт теплопровідності на температуру нагрівання тіла?
 - 2.7. Напишіть рівняння Пуассона.
3. *Випромінювання і конвекція*
 - 3.1. Яким чином здійснюється теплопередача випромінюванням? В яких випадках враховується цей спосіб теплопередачі?
 - 3.2. Яким чином здійснюється теплопередача конвекцією? Які види цієї теплопередачі?
 - 3.3. Від яких чинників залежить кількість тепла при випромінюванні і конвекції?
 - 3.4. Написати загальний вираз для теплопередачі випромінюванням та конвекцією.
 - 3.5. Як визначають питомий коефіцієнти теплопередачі з поверхні?
 - 3.6. Що дозволяє визначити число Нусельта?
 - 3.7. Що визначають числа Рейнольдса і Прандтля?
4. *Розрахунок нагрівання*
 - 4.1. Написати рівняння нагріву однорідного тіла. Як визначити сталу нагрівання?
 - 4.2. Який засіб використовують для розрахунків сталих теплових процесів? Які використовують закони та аналогії?
 - 4.3. Яка послідовність теплового розрахунку?

- 4.4. Напишіть загальні вирази для теплових опорів у випадках теплопередач теплопровідністю та з поверхні.
- 4.5. Що таке тепловий чинник? Що він означає, і де використовують?
- 4.6. Подати теплову схему заміщення для асинхронних двигунів з к.з. ротором, висотою обертання до 250мм і ступеню захисту IP44. Дати пояснення.
- 4.7. Загальні підходи до розрахунку несталих теплових процесів.

7. Механічний розрахунок

Метою механічних розрахунків є забезпечення механічної надійності усіх деталей і вузлів електричної машини, на які діють зусилля.

Зусилля виникають у двох випадках:

- у процесі виготовлення машини;
- під час роботи.

Залежно від характеру механічних зусиль і властивостей матеріалу об'єкту, який перевіряють на надійність, розраховують припустимі межі робото здатності по наступним критеріям:

- міцності;
- текучості;
- втоми.

У свою чергу для міцності і текучості конкретизують припустимі межі у разі:

- розтягу (стиснення);
- згинання (вигинання);
- кручення.

При проведенні оцінки механічної міцності треба визначитись з характером діючого навантаження, наслідком його дії і припустимими межами зусиль. У якості припустимих меж навантаження використовують питомі механічні зусилля у МПа.

Різноманіття об'єктів перевірки потребує індивідуального підходу, але можна показати деякі загальні.

Найбільш розповсюджені в електричних машинах розрахунки меж міцності. Ці межі знаходять при розтягу (стисненні), згинанні (прогину, вигинанні) та крученні:

$$\sigma_{np} \geq \frac{Q_3}{S}, \quad (7.1)$$

чи

$$S \geq \frac{Q_3}{\sigma_{np}}, \quad (7.2)$$

де Q_3 – механічне зусилля (навантаження), Н;

S – площа, на яку діє навантаження, м²;

σ_{np} – припустиме навантаження при розтягу (стисненні), МПа.

Межі розтягу використовують у машинах постійного струму для забезпечення кріплення осердя листів полюсів та болтів до станини.

Перевірку на міцність при розтягу (стисненні) проводять для стягуючих шпильок осердя статора потужних машин, запірних дугових шпонок, болтів та хвостів кріплення полюсів явно полюсних синхронних машин, бандажні кільця обмоток статора, бандажі на лобових частинах обмотки ротора, фундаментні болти і таке інше.

Міцність на згинання перевіряють натискні шайби і пальці, які скріплюють пакети магнітопроводу, а на вигинання – провідники обмотки збудження та кромки полюсів синхронних явнополюсних машин; на вигин (прогин) – вал електричних машин.

На зусилля кручення перевіряють перерізи валів у місці переходу від одного діаметру до другого.

У ряді випадків необхідно перевіряти міцність при дії декількох факторів. На-

приклад, перерізи вала одночасно перевіряють на спільну дію прогину та кручення; клини пазів ротора – на прогин та зріз. Додатково вал перевіряють на критичну швидкість.

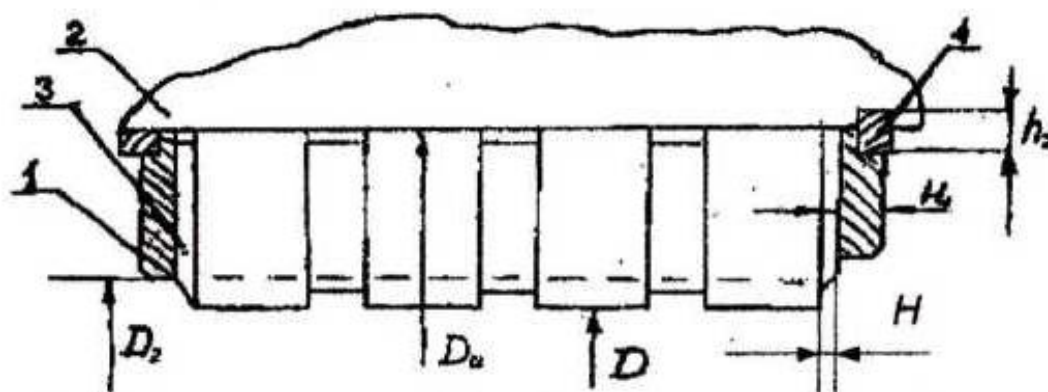
Прикладом перевірки на циклічність (втому) є розрахунки підшипників.

Перераховані приклади розрахунків механічної надійності не враховують усіх реальних випадків. Більш детально приклади і розрахунки викладено у [1, 2, 3].

Задача 7.1.

Визначити товщину H_1 натискної шайби, розміри натискних пальців для синхронного двигуна $P_n = 500 \text{ кВт}$, $U_n = 6 \text{ кВ}$, $n_n = 500 \text{ об/хв}$, якщо відомі наступні величини: $q_c = 10^6 \text{ Па}$ - питоме зусилля запресування пакету статора; $D_a = 1,18 \text{ м}$ - зовнішній діаметр статора; $D = 0,9 \text{ м}$ - діаметр розточки статора; $D_2 = 1,05 \text{ м}$ - внутрішній діаметр натискної шайби; $z_1 = 90$ - кількість пазів статора; $h_n = 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ та $b_n = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - розміри паза статора.

Переріз пальця прямокутний ($B \times H$), прийняти ширину пальця $B = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Конструкція та позначення наведені на рис. 7.1.



1 – натиску вальна шайба; 2 – ребро станини;
3 – натиску вальні пальці; 4 – запірна шпонка

Рисунок 7.1

Задача 7.2.

У синхронному двигуні типу СДЗ перевірити на механічну міцність натискні шайби та пальці, шпонки, якщо відомо: $P_n = 1250 \text{ кВт}$ - номінальна потужність; $D_a = 0,99 \text{ м}$ - зовнішній діаметр статора; $D_2 = 0,6694 \text{ м}$ - внутрішній діаметр натискної шайби; $z_1 = 48$ - кількість пазів статора; $h_n = 6,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - висота паза статора; $b_n = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - ширина паза статора; товщина пальця - $H = 0,012 \text{ м}$; ширина пальця $B = 0,008 \text{ м}$; контактна поверхня шпонки для шайби $b_2 \times h_2 = 6 \cdot 10^{-2} \times 98 \cdot 10^{-2}$; товщина натискної шайби $H_1 = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; кількість шпонок $m = 6$ (див. рисунок 7.1).

Задача 7.3.

У синхронному двигуні перевірити по допустимим напругам на згин натискні шайбу та палець, а також на міцність стяжну шпильку, якщо відомо: $P_n = 4 \text{ МВт}$ - номінальна потужність; $U_n = 6 \text{ кВ}$ - номінальна напруга; $n_n = 750 \text{ об/хв}$ - частота обертання; $D_a = 5,65 \text{ м}$ - зовнішній діаметр статора; $D = 5,35 \text{ м}$ - діаметр розточки

статора; $D_2 = 5,538 \text{ м}$ - внутрішній діаметр натискної шайби; $z_1 = 384$ - кількість зубців статора; $h_n = 94,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - висота паза статора; $b_n = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - ширина паза статора; товщина пальця - $H = 0,025 \text{ м}$; ширина пальця $B = 0,023 \text{ м}$ (переріз пальця прямокутний); товщина шайби $H_1 = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; діаметр різьби стяжної шпильки М36. Конструкція та позначення показані на рис. 7.2.

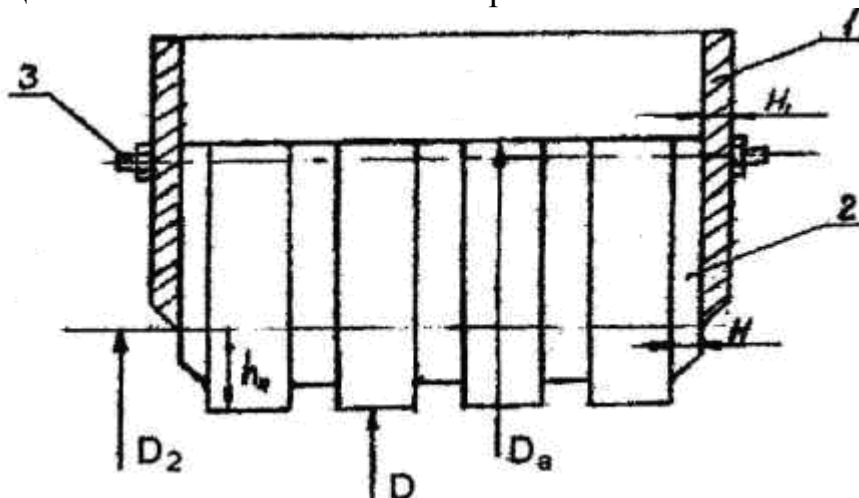


Рисунок 7.2

Задача 7.4.

У синхронному двигуні типу СДС перевірити на механічну міцність натискувальні шайбу та пальці, стяжну шпильку, якщо: $P_n = 1600 \text{ кВт}$ - номінальна потужність; $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ - номінальна напруга; $n = 125 \text{ об/хв}$ - частота обертання; $D_a = 3,25 \text{ м}$ - зовнішній діаметр статора; $D = 3,05 \text{ м}$ - діаметр розточки статора; $D_2 = 3,15 \text{ м}$ - внутрішній діаметр натискувальної шайби; $Z_1 = 252$ - кількість пазів статора; $h_n = 65,7 \text{ мм}$ - висота паза; $b_n = 16 \text{ мм}$ - ширина паза (паз прямокутний); висота пальця - $H = 0,012 \text{ м}$; ширина пальця $B = 0,006 \text{ м}$; (переріз пальця прямокутний); товщина шайби $H_1 = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ (див. рисунок 7.2).

Задача 7.5.

Допустима напруга для сталі СТЗ - $600 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Чи можливе застосування натискувальної шайби товщиною $H_1 = 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ для кріплення осердя статора синхронного двигуна? Двигун має наступні данні: $D_a = 3,25 \text{ м}$ - зовнішній діаметр статора; $D = 2,9 \text{ м}$ - діаметр розточки статора; $D_2 = 3,08 \text{ м}$ - внутрішній діаметр натискувальної шайби; $Z_1 = 180$ - кількість пазів статора; $h_n = 7,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - висота паза статора; $b_n = 17,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - ширина паза статора; $q_c = 0,8 \text{ МПа}$ (див. рисунок 7.2).

Задача 7.6.

Є явнополосний синхронний двигун, у якого: $P_n = 2 \text{ МВт}$ - номінальна потужність; $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ - номінальна напруга; $n = 3,75 \text{ об/хв}$ - частота обертання; ККД $\eta = 95,6 \%$; $D_a = 2,15 \text{ м}$ - зовнішній діаметр статора; $D = 1,76 \text{ м}$ - діаметр розточки статора.

Розрахувати кількість шпильок у двигуні, якщо використані шпильки М36 ($S_0 = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$), напруга для шпильок зі сталі Ст5 $\sigma = 2100 \cdot 10^5 \text{ Па}$, зусилля запресовки на 1 м^2 - $q_c = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$, переріз паза статора - $S_n = 0,172 \text{ м}^2$ (див. рисунок 7.2).

Задача 7.7.

Визначити діаметр бандажного кільця обмотки статора синхронної машини, якщо відомо: $P_n = 1,6 \text{ МВт}$ - номінальна потужність; $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ - номінальна напруга; номінальний струм - $I_n = 127 \text{ А}$; $n = 750 \text{ об/хв}$ - частота обертання; ККД $\eta = 96 \%$; $2p = 8$;

марка сталі - Ст3; $D_k=1,05$ м - зовнішній діаметр кільця; $\sigma=1800 \cdot 10^5$ Па - зусилля; $m_k=1$ кількість кілець; $x=0,2$ - відносний перехідний реактивний опір обмотки статора.

Задача 7.8.

У синхронному двигуні потужністю $P_n=2500$ кВт, напругою $U_{ном}=10$ кВ з $n=150$ об/хв - номінальна частота обертання, перевірити необхідність установки бандажних кілець на лобові частини обмотки, якщо відомо: середня ширина котушки $b_{кт}=0,176$ м, коефіцієнт $K_{вил}=0,34$, виліт прямолінійної частини котушки з пазу $b=0,065$ м, висота паза $h_n=0,0816$ м.

Задача 7.9.

Зробити розрахунок підшипника ковзання синхронного двигуна, який має наступні параметри: $P_n=4$ МВт - номінальна потужність, кількість фаз $m=3$, $n=375$ об/хв - номінальна частота обертання, $f=50$ Гц, ККД $\eta=96\%$, $\cos\varphi=0,9$, відстань між опорами $L=2,57$ м, діаметр шийки вала $d=0,285$ м, сила однобічного магнітного притягання $T_0=43077$ Н, маса ротора $m_p=8574,63$ кг, поперечна сила, яка виникає під дією навантаження $F_n=63666,66$ Н, відстань від опори до точки прикладення сили $F_{n-c}=0$, відстань від опори до точки прикладення сили $G_{p-b}=0,75$ м. (рисунок 7.3).

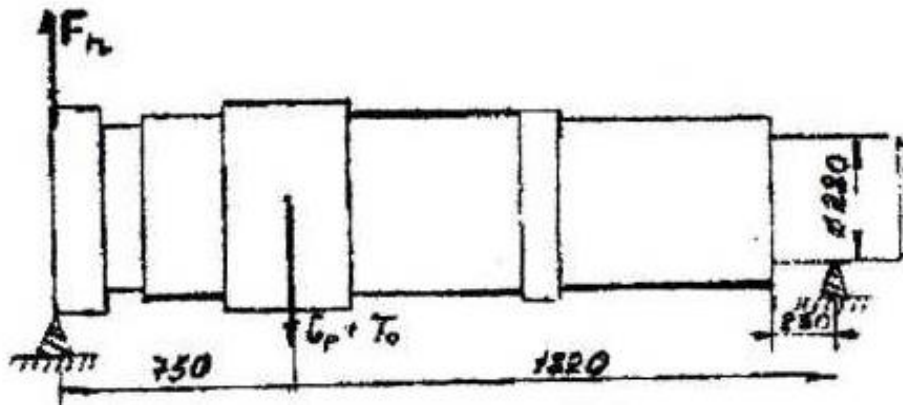


Рисунок 7.3

Задача 7.10.

Для двигуна із номінальною потужністю $P_n=4$ МВт, $U_n=10$ кВ, $n_1=1000$ об/хв - номінальна частота обертання, $f=50$ Гц, $\cos\varphi=0,9$, ККД $\eta=95,5\%$, розрахувати радіальні навантаження на підшипники, якщо: поперечна сила $F_n=57300$ Н, сила ваги ротора $G_p=43007$ Н, сила однобічного магнітного притягання $T_0=39726$ Н, розміри $a=0,8$ м, $b=0,81$ м, $L=1,76$ м, $c=0,45$ м (рисунок 7.4).

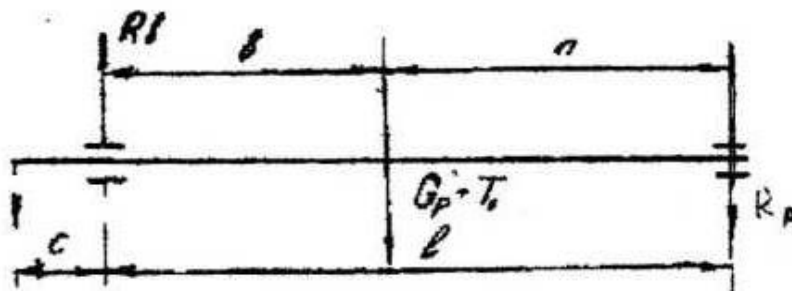


Рисунок 7.4

Задача 7.11.

Визначити внутрішній діаметр кожного із 4-х болтів, за допомогою яких кріпиться головний полюс прокатного реверсивного двигуна постійного струму потужністю $P_n=4560$

кВт, $n_n=70$ об/хв - номінальна частота обертання, $k=M_{\max}/M_n$ - коефіцієнт перевантаження, $2p=24$, $D=3,6$ м - діаметр якоря (зовнішній), $m_{\text{по}}=660$ кг - маса одного полюсу з обмоткою, матеріал болтів - сталь Ст3.

Задача 7.12.

Синхронний двигун для приводу компресора має наступні дані: $P_n=4000$ кВт, $f=50$ Гц, $n=375$ об/хв - номінальна частота обертання, $m=3$. Визначити кількість болтів для кріплення головного полюса масою $m_n=202,58$ кг, якщо також відомо: зовнішній радіус магнітного колеса $H=0,86$ м, висота полюсу $h_{\text{пр}}=0,215$ м, внутрішній діаметр різьби болта $d_0=0,043$ м.

Задача 7.13.

Визначити відцентрову силу полюса з обмоткою для синхронного двигуна з даними: $P_n=4$ МВт, $U_n=10$ кВ, $n=10000$ об/хв - номінальна частота обертання, $f=50$ Гц, $\cos\phi=0,9$, ККД $\eta=95\%$. Сила визначається на 1 м довжини полюса, якщо частота обертання максимальна ($n_{\max}=1,2n_n$) та задані розміри поперечного перерізу обмотки збудження: $a_e=0,005$ м, $b_e=0,025$ м, кількість витків $W_e=34$, площа поперечного перерізу $S_m=0,112$ м², $H=0,139$ м та $h_{\text{пр}}=0,262$ м (рисунок 7.5).

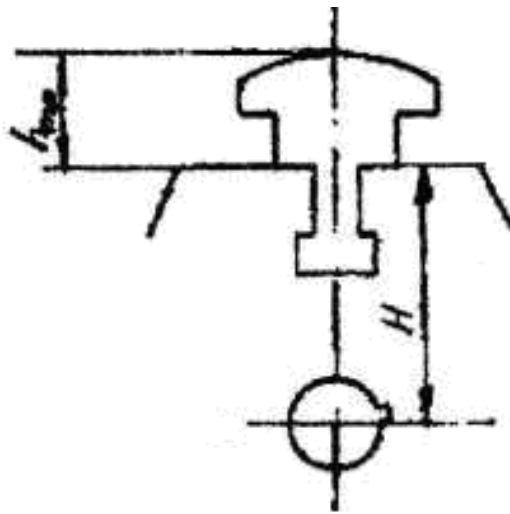


Рисунок 7.5

Задача 7.14.

Розрахувати, вибрати та перевірити на механічну міцність клин для обмотки якоря генератора постійного струму, якщо відомо: переріз голого провідника, який лежить в пазу $(a \times b)=(4,1 \times 12,5) \cdot 10^{-6}$ м², всього в пазу таких провідників $N=4$, ширина паза $b_n=11 \cdot 10^{-3}$ м, висота паза $h_n=38 \cdot 10^{-3}$ м, зовнішній діаметр якоря $D_2=0,59$ м, $n_1=1000$ об/хв - номінальна частота обертання, максимальна частота обертання якоря $n_{\max}=1250$ об/хв. Матеріал клину - бук.

Задача 7.15.

Яку кількість витків дротового бандажу необхідно накласти на лобові частини генератора постійного струму з однієї сторони, якщо відомо: $(a \times b)=(4,1 \times 12,5) \cdot 10^{-6}$ м² - переріз голого мідного провідника, всього в пазу таких провідників $N=4$, діаметр якоря - $D_2=0,59$ м, кількість зубців (пазів) якоря $Z=56$, кількість полюсів генератора $2p=6$, висота паза якоря - $h_n=38 \cdot 10^{-3}$ м, максимальна частота обертання якоря $n_{\max}=1250$ об/хв. Яку кількість витків бандажу необхідно у випадку виготовлення його із склострічки?

Задача 7.16.

Перевірити необхідність встановлення міжполюсної розпірки у явнополюсного синхронного двигуна потужністю $P_n=2,5$ МВт, $U_n=1000$ В та частота обертання $n_n=150$ об/хв.

Котушка збудження має два радіуси закруглення, додатково відомі розміри: $r=1,9 \cdot 10^{-2}$ м, $l=5,5 \cdot 10^{-2}$ м, $b_e=1,95 \cdot 10^{-2}$ м, $L=56,5 \cdot 10^{-2}$ м. Прийняти $n_{\max}=1,2$ Гц та коефіцієнт $K=0,875$.

Задача 7.17.

Визначити напругу на згин для котушки обмотки збудження з двома радіусами закруглення та необхідну кількість розпірок для синхронного двигуна потужністю $P_n=2000$ кВт, $U_n=10$ кВ та частотою обертання $n_n=1000$ об/хв, ККД $\eta=94,5\%$, кількість витків в обмотці збудження 46, коефіцієнт, який враховує зменшення напруг при збільшенні відношення $\mu=r/L$, $k=0,97$, розміри котушки: $r=0,03$ м, $l=0,198$ м, $b_e=2,2 \cdot 10^{-2}$ м, $L=0,616$ м, $a_e=0,328$ м (рисунок 7.6).

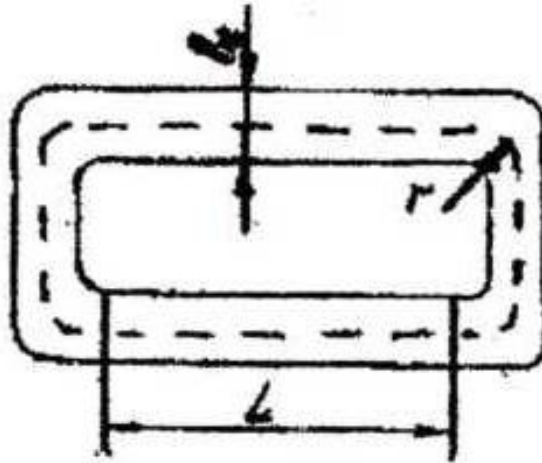


Рисунок 7.6

Задача 7.18.

Визначити необхідну кількість розпірок для синхронного генератора потужністю $P_n=3500$ кВт, $U_n=6300$ В та частотою обертання $n_n=1000$ об/хв, максимальна швидкість обертання якоря $n_{\max}=1200$ об/хв. Розміри котушки: $L=0,802$ м, $r=0,1$ м, $b_e=0,025$ м; коефіцієнт $K=0,925$ (рисунок 7.6).

Задача 7.19.

Визначити напругу найбільш навантаженого перерізу вала синхронного двигуна і порівняти його з допустимим, якщо відомо: $P_n=40$ МВт, $U_n=10$ кВ, $n_1=1000$ об/хв - номінальна частота обертання, $f=50$ Гц, $\cos\phi=0,9$, ККД $\eta=95,5\%$; момент згину в розрахунковому перерізі $M_{\text{виг}}=51695$ Н·м, номінальний обертальний момент $M_n=38200$ Нм, момент опору при згині $W=8 \cdot 10^{-4}$ м³, коефіцієнт перевантаження $K=2$, коефіцієнт $\alpha=0,6$, матеріал вала - сталь СТ45.

Задача 7.20.

У явнополюсному синхронному двигуні потужністю $P_n=2000$ кВт, $U_n=6$ кВ, $n_1=375$ об/хв - номінальна частота обертання, угин валу під дією сили ваги G_p у точці, яка відповідає середині пакету дорівнює $f_G=9,6 \cdot 10^{-5}$ м, угин від однобічного магнітного притягіння $f_m=9,82 \cdot 10^{-2}$ м, початковий угин від сили однобічного притягіння $f_T=7,1 \cdot 10^{-5}$ м, первісне зміщення ротора $l_0=0,416 \cdot 10^{-3}$ м. Знайти повний угин вала, дати оцінку, якщо повітряний проміжок $\delta=3,5 \cdot 10^{-3}$ м. Визначити критичну швидкість обертання вала двигуна.

Задача 7.21.

Визначити зусилля, яке діє на вал синхронного генератора, який з'єднаний з приводом за допомогою муфти (зусилля передачі F_n), якщо відомо: $P_n=3500$ кВт, $U_n=10,5$ кВ, $n_n=1000$

об/хв - номінальна частота обертання, $\cos\varphi=0,8$, ККД $\eta=95,9\%$, радіус по центру пальців $R=0,2$ м, коефіцієнт при з'єднанні муфтою $K_n=0,3$.

Задача 7.22.

Розрахувати вал синхронного двигуна типу СДМЗ, який з'єднаний з приводом через муфту і має наступні дані: $P_n=1600$ кВт, $U_n=6$ кВ, $n_n=375$ об/хв - номінальна частота обертання, маса ротора $m_r=2925,4$ кг, зовнішній діаметр ротора $D_2=1,11$ м, довжина пакета ротора $l_2=0,585$ м, радіус по центру пальців $R=0,282$ м, повітряний проміжок $\delta=0,004$ м. Розміри вала на рис. 7.7.

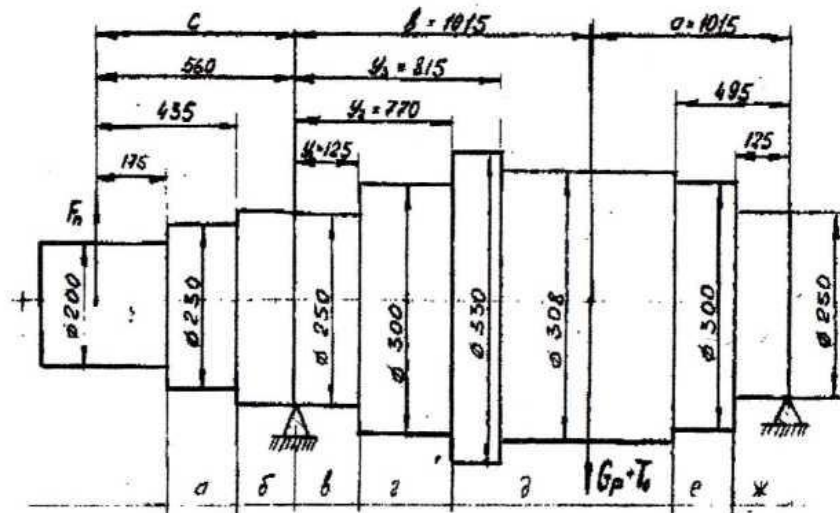


Рисунок 7.7

Задача 7.23.

Визначити результуючий угин вала синхронного двигуна потужністю $P_n=4$ МВт, $U_n=10$ кВ, кількість фаз $m=3$, $n_1=375$ об/хв - номінальна частота обертання, $f=50$ Гц, ККД $\eta=96\%$, який використовується для приводу компресора, якщо відомо: модуль пружності $E=2,06 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнти $S_a=5754,76$ 1/м, $S_b=349,65$ 1/м, маса ротора у збірці $m_r=8574,63$ кг, відстань від опор до точки прикладення сили G_r : $a=1,82$ м, $b=0,75$ м, відстань між опорами $L=2,57$ м, повітряний проміжок $\delta=0,005$ м, довжина осердя ротора, не враховуючи радіальних вентиляційних каналів, $L_2=0,577$ м, діаметр ротора $D_2=2,15$ м. Вважати, що відстань від точки прикладення сили F_n до найближчої опори $c=0$.

Задача 7.24.

Розрахувати вал асинхронного двигуна, якщо відомо: номінальний момент $M_n=48000$ Нм, маса ротора $m_r=4960$ кг, зовнішній діаметр осердя ротора $D_2=1,32$ м, повітряний проміжок $\delta=0,0041$ м, довжина осердя $L_2=0,83$ м, з'єднання двигуна з приводом через еластичну муфту $R=0,3$ м. Розміри вала на рис. 7.8.

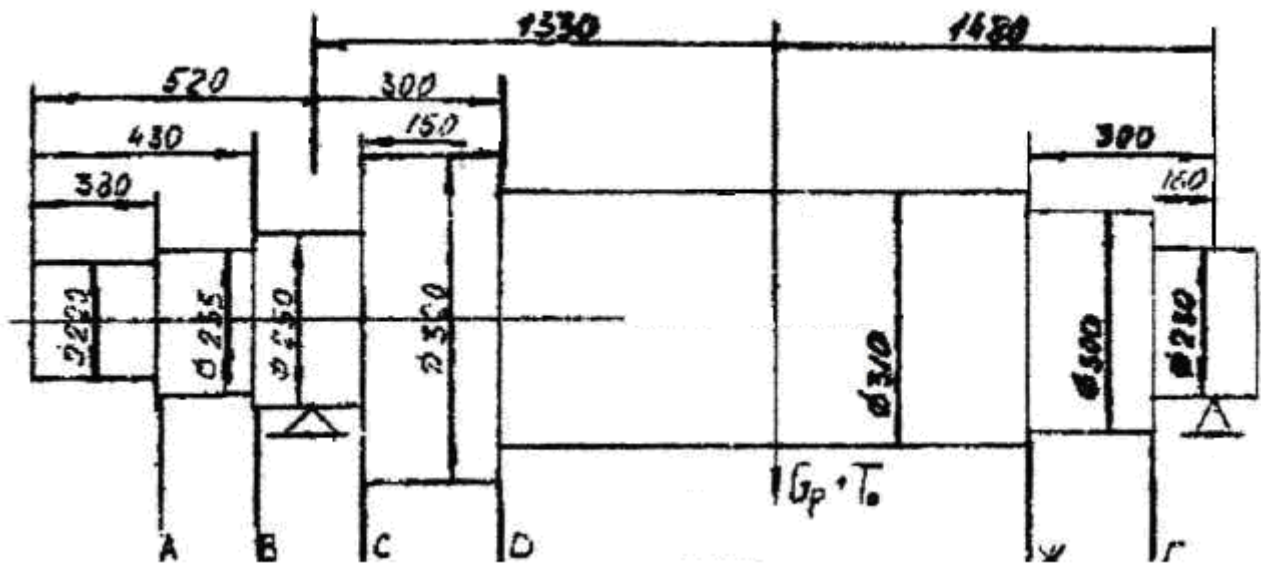


Рисунок 7.8

Задача 7.25.

Розрахувати на жорсткість, критичну частоту обертання та міцність валу синхронного двигуна типу СДЗ, якщо відомо: номінальна потужність $P_n=630$ кВт, $U_n=380$ В, $n_1=1500$ об/хв - номінальна частота обертання, маса ротора $m_p=622,2$ кг, маса ротора з урахуванням маси сталі вала під осердя $m_p=673,2$ кг, довжина пакета ротора $L_2=0,37$ м, коефіцієнт навантаження $K=2$, величина однобічного повітряного проміжку $\delta=0,00406$ м. Передача обертання здійснюється гнучкою муфтою з діаметром між пальцями $D=0,4$ м. Ескіз вала подано на рис. 7.9.

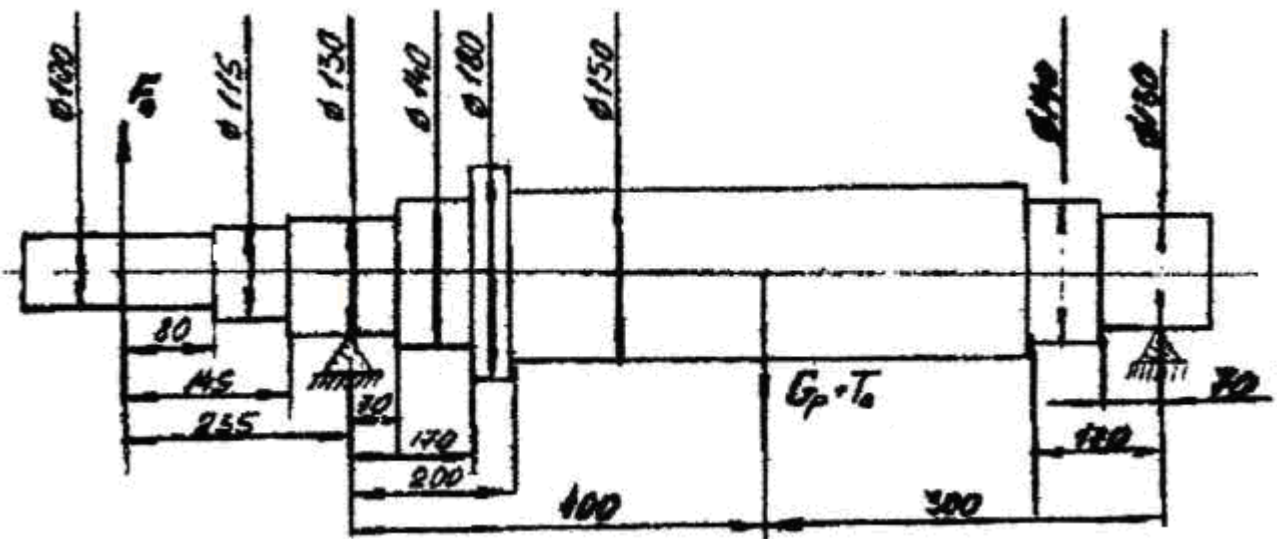


Рисунок 7.9

Задача 7.26.

Розрахувати вал синхронного двигуна типу СДС, якщо: номінальна потужність $P_n=2$ МВт, $U_n=6$ кВ, $n_n=150$ об/хв номінальна частота обертання, маса ротора $m_p=6238$ кг, зовнішній діаметр ротора $D_2=2,98$ м, діаметр вала $D=0,47$ м, довжина пакета ротора $l_2=0,425$ м, величина повітряного проміжку $\delta=0,004$ м. З'єднання з валом здійснюється жорсткою муфтою, радіус муфти по пальцям $R=0,5$ м. Ескіз вала подано на рис. 7.10.

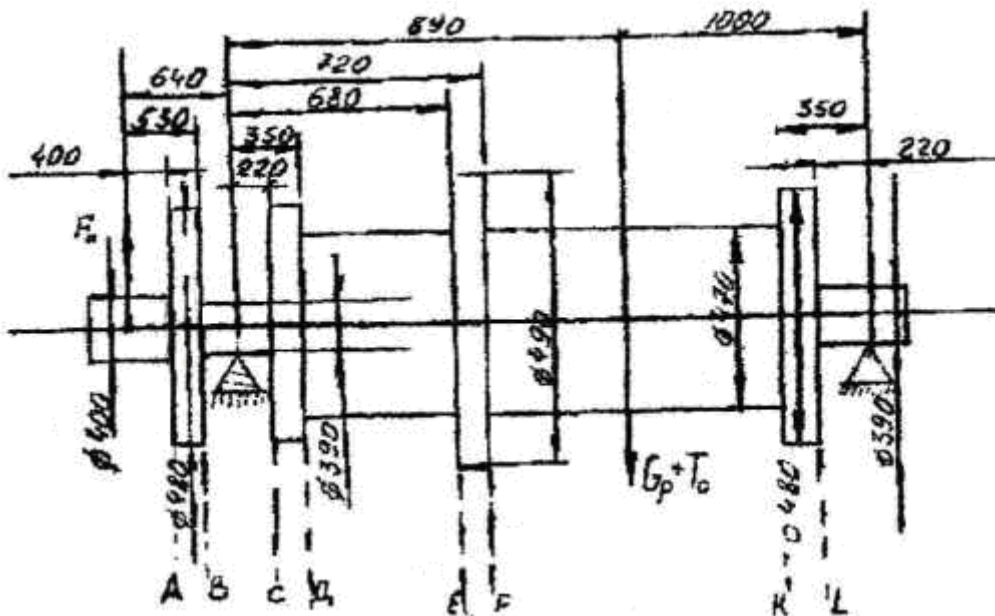


Рисунок 7.10

Контрольні питання до розділу 7

1. Загальні положення.

- 1.1. Мета механічного розрахунку електричних машин?
- 1.2. Які критерії використовують при оцінці механічної міцності елементів конструкції?
- 1.3. Що розуміють під коефіцієнтом запаса міцності? На що впливає його величина?
- 1.4. Коли виникають у електричній машині механічні напруги?
- 1.5. Які сили діють при роботі електричної машини?
- 1.6. Які елементи конструкції статорів повинні перевірити на механічну міцність?
- 1.7. Які елементи конструкції роторів повинні перевірити на механічну міцність?

2. Механічні напруги навантаження під час виготовлення електричних машин.

- 2.1. Яка величина питомої сили пресування сталі осердя?
- 2.2. Навіщо у електричних машинах потужністю більш 400кВт використовують натискуючі шайби та пальці?
- 2.3. Подати ескіз конструкції кріплення осердя статора за допомогою натискуючих шайби і пальця та запірної шпонки.
- 2.4. Подати ескіз кріплення осердя статора електричних машин великої потужності.
- 2.5. Подати ескізи можливих кріплень осердь роторів асинхронних двигунів та машин постійного струму.
- 2.6. На що перевіряють механічну міцність натискуючих шайб?
- 2.7. На що перевіряють елементи кріплення осердь роторів асинхронних машин та машин постійного струму?
- 2.8. Яке кріплення полюсів синхронних явнополюсних машин та машин постійного струму при виготовленні?

3. *Перевірка механічної міцності елементів конструкції статорів при роботі електричних машин.*
- 3.1. Перерахувати елементи конструкції статорів, які підлягають перевірці на механічну міцність.
 - 3.2. Перелічити сили, які діють на статор.
 - 3.3. Які сили діють на осердя магнітопроводу? Міри що до їх кріплення?
 - 3.4. Який порядок розрахунку головних полюсів машин постійного струму?
 - 3.5. Навіщо використовують бандажні кільця на лобові частини обмоток статора? Коли і на що розраховуються?
 - 3.6. Які конструктивні рішення існують для кріплення бандажних кілець на лобових частинах обмотки статора?
 - 3.7. Куди прикладена сила: до зубця, чи до провідників, розташованих в пазах? А як в безпазових обмотках?
4. *Перевірка механічної міцності елементів конструкції роторів при роботі електричних машин.*
- 4.1. Які сили діють на елементи конструкції роторів, обертових електричних машин?
 - 4.2. Перелічити основні елементи конструкцій роторів, які підлягають перевірці на механічну міцність?
 - 4.3. Послідовність розрахунку клинів?
 - 4.4. На що перевіряють лист осердя магнітопроводу?
 - 4.5. Послідовність перевірки зубця ротора.
 - 4.6. Які сили і як розраховують бандажі на лобових частинах та якорі машин постійного струму? Який матеріал використовується для бандажів?
 - 4.7. Які сили діють на полюс явнополюсних синхронних машин? Як кріпиться? Як перевіряється кріплення?
 - 4.8. Навіщо існує перевірка механічної міцності обмоток збудження явнополюсних синхронних машин? Які конструктивні рішення щодо забезпечення міцності?
 - 4.9. На що перевіряють вал? Які діють сили?
 - 4.10. Що означає перевірка вала на міцність?

Список рекомендованой литературы

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебн. для студент. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп.-Л.:Энергия, 1974-840с.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С.. Проектирование электрических машин: Учеб. для втузов/Под ред. О Д. Гольберга. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк. 2001. - 430с.
3. Копылов И.П. и др. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов/Под ред. И.П. Копылова. -М.: Энергия, 1980-496с.
4. Постников И.М. Проектирование электрических машин. - Киев: Гостехиздат. УССР, 1960-905с.
5. Шуйский В.П. Расчет электрических машин (перевод с немец.) - Л.: Энергия, 1968-732С.
6. Анпілогов М.Г., Давидов О.М., Цивінський С.С. Основи автоматизованого проектування електричних машин – 2. / Навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка»: Електронне видання з грифом «Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ», 20.05.2013р., протокол №10., С. – 311.