

Міністерство освіти України
Національний Технічний Університет України
Київський Політехнічний Інститут

Проектування електричних машин

Конспект лекцій

Частина 2

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП	4
РОЗДІЛ № 1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД	5
1.1. Основні закони та вирази	5
1.2. Класифікація обертових електричних машин	9
1.3. Послідовність розрахунків при проектуванні ЕМ	12
1.4. Короткий огляд матеріалів, що застосовуються у електричних машинах	19
РОЗДІЛ № 2. ПРОЕКТУВАННЯ ЯКІРНИХ ОБМОТОК ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	27
2.1. Мета проектування якірних обмоток	27
2.2. Конструктивні форми виконання обмоток якорів	27
2.3. Короткозамкнені обмотки	36
2.4. Висновки та рекомендації	38
2.5. Розрахунок електрорушійних сил якірних обмоток при проектуванні	39
2.6. Коротка характеристика особливостей основних типів якірних обмоток електричної машини	45
2.7. Проектування якірних обмоток	56
РОЗДІЛ № 3. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА	73
3.1. Мета і загальний підхід до розрахунку магнітного кола	73
3.2. Розрахунок магніторушійної сили повітряного проміжку	75
3.3. Розрахунок магніторушійної сили зубців	79
3.4. Розрахунок магніторушійних сил ярем	86
3.5. Розрахунок магніторушійних сил явновиражених полюсів	89
3.6. Сумарна МРС машини на пару полюсів. крива намагнічування	91
РОЗДІЛ № 4. РОЗРАХУНОК ВТРАТ У СТАЛІ	95
4.1. Розрахунок основних втрат	95
4.2. Додаткові втрати в сталі магнітопроводу	100
РОЗДІЛ № 5. ПАРАМЕТРИ ЯКІРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	106
5.1. Загальні відомості	106
5.2. Активний опір якірних обмоток	107
5.3. Індуктивний опір взаємоіндукції	113
5.4. Індуктивний опір розсіювання	115
РОЗДІЛ № 6. ВЕНТИЛЯЦІЙНІ РОЗРАХУНКИ	130
6.1. Загальні відомості	130
6.2. Зв'язок системи вентиляції і конструкції електричних машин	133
6.3. Основні співвідношення	143
6.4. Аеродинамічні опори	145
6.5. Вентиляційна схема заміщення	148
6.6. Типи вентиляторів. Статична характеристика	150
6.7. Розрахунок відцентрового вентилятора	156
РОЗДІЛ № 7. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	159
7.1. Загальні відомості	159
7.2. Способи теплопередачі	162
7.3. Визначення коефіцієнта теплопередачі з поверхні	166

7.4. Нагрівання однорідного тіла	170
7.5. Теплова схема заміщення	172
7.6. Приклад складання теплової схеми заміщення.....	175
7.7. Застосування методу вузлових потенціалів для розрахунку теплових схем заміщення	179
7.8. Уточнена теплова схема заміщення	180
7.1. Теплова схема заміщення асинхронного двигуна з корокозамкнутим ротором серії 4А зі ступенем захисту IP23 і висотою осі обертання від 160 до 250 мм включно	182
7.2. Теплова схема заміщення асинхронного двигуна типу ДАЗО (для самостійної роботи).....	184
7.3. Спрощені оцінки нагрівання електричних машин	185
7.4. Перепад температури в ізоляції обмотки якоря.....	186
7.5. Перевищення температури зовнішньої поверхні.....	188
7.6. Перевищення температури лобових частин	189
7.7. Перевищення температури обмоток	190
7.8. Місцеві перегріву	191
7.9. Спрощений розрахунок несталого режиму нагрівання.....	192
РОЗДІЛ № 8. МЕХАНІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	194
8.1. Загальні відомості	194
8.2. Короткий огляд конструкцій і характеру механічних впливів.....	195
8.3. Розрахунок механічних напружень, які виникають при виготовленні машин	203
8.4. Розрахунок кріплення головних полюсів машин постійного струму.....	205
8.5. Розрахунок валу.....	207
8.6. Перевірка міцності зубців ротора.....	214
8.7. Розрахунок клинів пазів ротора	215
8.8. Розрахунок напруг в магнітопроводі ротора.....	216
8.9. Перевірка міцності шпонок на роторі.....	216
8.10. Розрахунок бандажів роторів.....	217
8.11. Кріплення лобових частин обмоток статора	219
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	222

ВСТУП

Зміст дисципліни «Основи автоматизованого проектування електричних машин» має дві частини. В цьому конспекті наведена друга частина змісту дисципліни, яка містить основні необхідні відомості та послідовність проектування обертових ЕМРЕ.

Процес проектування обертових машин потребує знання багатьох розділів науки та техніки, а також сучасні досягнення. Він базується на знаннях, отриманих при вивченні дисциплін: «Вища математика», «Фізика», «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні машини», «Прикладна механіка», «Матеріалознавство» та «Технологія виробництва електричних машин».

Необхідність знань цих дисциплін впливає з переліку питань, що входять до змісту другої частини дисципліни:

- матеріали, які використовуються в електромашинобудуванні;
- проектування обмоток електричних машин, де подані основи виконання обмоток, їх різновид, особливості та вплив на техніко-економічні показники;
- загальна послідовність і особливості розрахунку магнітного кола;
- розрахунок втрат у сталі магнітного кола;
- розрахунки параметрів електричних машин;
- загальні основи вентиляційних розрахунків;
- оцінка теплового стану;
- визначення механічної міцності окремих вузлів конструкції.

Закріплення отриманих теоретичних знань відбувається за рахунок опитування на початку лекції основних положень, що були викладені на попередній лекції, та приведенням практичних завдань, де кожен студент отримує індивідуальне завдання по виконанню проектування (розрахунку) фрагментів з окремого розділу дисципліни.

Для перевірки якості сприйняття матеріалу дисципліни та самостійної роботи студентів на протязі поточного семестру проводяться дві контрольні роботи, які складають одну модульну контрольну роботу. Перша контрольна робота присвячена питанням проектування обмоток, розрахунків магнітного кола та втрат у сталі. Друга контрольна – вентиляційному та тепловому розрахункам.

Вміння використовувати теоретичні знання та отримання практичних навичок додає індивідуальне виконання курсового проекту на тему: «Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором загального призначення».

Окремо треба відзначити необхідність студенту самостійно ознайомитись з великим об'ємом довідкової інформації та вимогами міждержавних (ГОСТ) та державних (ДСТУ) стандартів.

Таким чином, лекційні матеріали, практичні заняття, виконання курсового проекту та наполеглива самостійна праця дозволять студенту опанувати достатнім об'ємом знань для розрахунку проектів, які відповідають освітньо-кваліфікаційним рівням бакалавр, спеціаліст та магістр, а також у практичній роботі після закінчення університету.

Студенти користуються цим конспектом лекцій у роздрукованому або електронному вигляді під час лекцій, що дозволяє збільшити обсяг матеріалу лекції, сприяє якісному викладанню та є суттєвою допомогою при самостійній роботі.

РОЗДІЛ № 1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД

Великий та різноманітний обсяг знань вимагає викладання систематизованого огляду, який показує послідовність і мету проектування окремих етапів. Ця послідовність повинна подати перелік дій, які необхідно виконати при проектуванні електричних машин.

1.1. Основні закони та вирази

Проектування електричних машин вимагає знання, вміння виконувати їх та аналізувати вплив окремих законів і основних виразів, які є необхідні для якісного проектування.

Нижче наведені основні закони та ряд залежностей, які використовують при проектуванні електричних машин. Ряд цих виразів використовувався у першій частині дисципліни, а інші – будуть розглянуті і використовуватись у подальшому викладанні змісту другої частини дисципліни.

Таке подання залежності має три мети:

- повторення основних залежностей, які викладені у змісті першої частини дисципліни і в подальшому використовуються у проектуванні електричних машин.
- попереднє знайомство з фізичними основами виразів, які використовують і будуть отримані при подальшому викладенні дисципліни.
- показати аналогії між окремими виразами різних етапів проектування, відрізняючись по фізичним явищам

У першій частині змісту дисципліни подане визначення електромагнітної (розрахункової) потужності:

$$S_{\Sigma M} = m \cdot E_1 \cdot I_1, \quad (1.1)$$

яку необхідно забезпечити у проектуваній машині (ЕМПЕ).

Цю потужність знаходять, використовуючи вихідні дані для проекту.

В основі (1.1) використовують ЕРС, яка є виразом закону електромагнітної індукції. Її діюче значення для усіх типів ЕМПЕ відображає формула:

$$E_1 = \pi \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot k_{o\delta 1}, \quad (1.2)$$

де величина обмоткового коефіцієнту $k_{o\delta 1}$ залежить від типу ЕМПЕ.

У загальному випадку магнітний потік

$$\Phi = \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot L_{\delta} \cdot \tau, \quad (1.3)$$

де величина α_{δ} - коефіцієнт полюсного перекриття, величина якого залежить від типу конструкції машини; $B_{\delta} = (0,1 \dots 1,0)$ Тл - індукція у повітряному проміжку; τ - полюсний поділ; L_{δ} - розрахункова довжина магнітопроводу.

Для усіх ЕМПЕ лінійне навантаження:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1 \cdot w_1}{\pi \cdot D} = \frac{u_n \cdot i_a}{t_1}, \quad (1.4)$$

w_1 - кількість послідовних витків у фазі (або у паралельній вітці); D - діаметр розто-

чки машин постійного струму; u_n - кількість провідників у пазу, по яким проходить струм паралельної вітки; $t_1 = \frac{\pi \cdot D}{Z_1}$ - зубцевий крок; кількість фаз ($m=1$ для машин постійного струму).

У ЕМПЕ з повітряним охолодженням $A = (1...7) \cdot 10^4 \text{ А/м}$.

Використовуючи вирази (1.1),(1.2),(1.3) та (1.4), у попередній частині дисципліни отримана залежність

$$S_{\text{эм}} = K \cdot (D^2 l_{\delta})(A \cdot B) \cdot f_1, \quad (1.5)$$

де K - величина, яка залежить від типу ЕМПЕ.

Використовуючи (1.1),(1.2),(1.3), (1.4) та (1.5) отримані вирази для сталих Арнольда та універсальній, які дозволяють зв'язати межі пошуку основних розмірів ЕМПЕ.

Основні розміри ЕМПЕ можуть приймати, враховуючі практичні та стандартні рекомендації чи розміри прототипу.

В подальшому проектуванні обмоток якоря використовують вирази, які отримані при вивченні змісту дисципліни «Електричні машини». Головнішим показником при проектуванні і виконанні обмотки є крок по пазам:

$$y = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon, \quad (1.6)$$

де ε - число, яке дозволяє отримати крок цілим числом.

Властивості обмотки залежать від скорочення кроку, розподілу витків групи та скося пазів, які відповідно враховують коефіцієнтами скорочення, розподілу та скося.

З курсу «Теоретичні основи електротехніки» відомий закон повного струму, який використовують для розрахунку магнітного кола ЕМПЕ у вигляді

$$\sum F_i = F_{\mu}, \quad (1.7)$$

де сумарну МРС магнітного кола визначають на пару полюсів, як суму МРС окремих ділянок, які мають однакові індукції.

Розрахункова величина МРС дозволяє знайти струм намагнічування асинхронної машини

$$I = \frac{F_{\mu} \cdot p}{0,9 \cdot W_1 \cdot K_{об1}}, \quad (1.8)$$

або струм (постійний) збудження для синхронних машин та машин постійного струму

$$i = \frac{F_{\mu}}{W_k}, \quad (1.9)$$

де W_k - кількість витків на одному полюсі.

Вказані струми намагнічування створюють МРС, яка зумовлює магнітний потік, а останній – при неробочому ході ЕРС. Це відображено залежністю для окремої ділянки магнітопроводу

$$F = \Phi \cdot R_{\mu}, \quad (1.10)$$

де $R_{\mu} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{L}{S}$ - магнітний опір $A/B\delta$; μ - магнітна проникливість ділянки магнітопроводу з постійною індукцією Gn/m ; L - довжина магнітної силової лінії на цій ділянці m ; S - площа ділянки, яку перерізають магнітні силові лінії m^2 .

Розрахунки властивостей та робочих характеристик ЕМПЕ потребують відомими відповідних параметрів (активні та індуктивні опори), які залежать не тільки від електромагнітних навантажень

$$r, x \sim \frac{A}{B_{\delta}}, \quad (1.11)$$

але і від конструктивних розмірів, вплив яких подається у вигляді аналітичних та дослідних виразів у подальшому змісту дисципліни.

Як відомо, надійність роботи ЕМПЕ залежить від електричної, термічної (теплової) та механічної міцності. Якщо електричну міцність забезпечують відповідними розмірами та типом ізоляції при проектуванні обмоток, то термічну міцність забезпечують відповідною системою охолодження.

Система охолодження включає шляхи і способи пересування охолоджуючого агента та визначення перевищення температури окремих частин конструкції ЕМПЕ над оточуючим повітрям або середовищем. Температура нагрівання не повинна бути більше припустимої температури, яка залежить від класу нагрівостійкості ізоляції.

Якщо охолодження здійснюють повітрям оточуючого середовища, то таку систему охолодження називають вентиляція.

Основними аналітичними виразами при розрахунку вентиляції є залежності:

- необхідні витрати повітря V (m^3/c) при заданій різниці температури між гарячим та холодним повітрям $\Delta\theta$ ($^{\circ}C$) та теплоємності повітря C ($Дж \cdot c/m^3$)

$$V = \frac{\sum p}{C \cdot \Delta\theta}, \quad (1.12)$$

де $\sum p$ - кількість втрат, які потрібно відвести з машини, Bm ;

- тиск, який необхідний для створення витрат повітря:

$$H = V^2 \cdot Z, \quad (1.13)$$

де H - тиск, який забезпечує вентилятор, $Па/m^2$; Z - загальний аеродинамічний опір повітропроводу, який визначають сумою аеродинамічних опорів на окремих ділянках повітропроводу, де має місце втрати тиску, $(Па \cdot c^2)/m^8$.

Цей опір визначають виразом:

$$Z_i = \xi_i \cdot \frac{1}{S_i}, \quad (1.14)$$

де ξ_i - аеродинамічний коефіцієнт, який залежить від конструктивної особливості ділянки, де втрачається тиск; S_i - площа перерізу цієї ділянки повітропроводу.

Вентиляція повинна забезпечити необхідні швидкості повітря над охолоджувальними поверхнями, щоб отримати такі коефіцієнти теплопередачі (конвекцією),

які гарантують температуру нагрівання окремих частин конструкції не більш припустимих.

Враховуючи найбільш стандартне значення температури оточуючого повітря 40 °C, знаходять перевищення температури над оточуючим повітрям, яке складається з окремих перевищень (перепадів) температур на окремих ділянках від нагрітої ділянки до оточуючого повітря.

У більшості випадків теплопередача у ЕМПЕ передається шляхом теплопровідності та конвекцією.

Кількість тепла Q (Bm) передається:

- теплопровідністю

$$Q_{\lambda} = \lambda \cdot \Delta\theta \cdot \frac{S}{L}, \quad (1.15)$$

- конвекцією

$$Q_{\alpha} = \alpha \cdot \Delta\theta \cdot S, \quad (1.16)$$

де λ – питома теплопровідність твердого середовища, $Bm/(m \cdot ^\circ C)$; α – коефіцієнт теплопередачі з поверхні (конвекцією), $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; S – площа, через яку проходить тепло (тепловий потік), або з якої відводиться тепло, m^2 ; $\Delta\theta$ – температура перевищення (перепад) між точками ділянки з однаковим способом теплопередачі, $^\circ C$; L – довжина шляху теплового потоку між точками ділянки з теплопередачею теплопровідністю, m .

З (1.15) та (1.16) витікають вирази перепаду температур при теплопередачах:

- теплопровідністю

$$\Delta Q_{\lambda} = Q_{\lambda} \cdot L / (\lambda \cdot S_{\lambda}) = Q_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \cdot ^\circ C, \quad ^\circ C / Bm, \quad (1.17)$$

- конвекцією

$$\Delta Q_{\alpha} = Q_{\alpha} / (\alpha \cdot S_{\alpha}) = Q_{\alpha} \cdot R_{\alpha} \cdot ^\circ C, \quad ^\circ C / Bm, \quad (1.18)$$

де $R_{\lambda} = L / (\lambda \cdot S)$ – тепловий опір при теплопередачі теплопровідністю;

$R_{\alpha} = 1 / (\alpha \cdot S)$ – тепловий опір при теплопередачі конвекцією.

Механічна міцність окремих частин і деталей конструкції ЕМПЕ характеризується різними критеріями і розрахунковими формулами, які залежать від зусилля, місця дії та матеріалу конструкції.

В узагальненому виді перевірку на механічну міцність можна записати у вигляді

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq \sigma_{\text{дон}}, \quad Pa, \quad (1.19)$$

де F – сила, діюча на конкретну частину конструкції ЕМПЕ, H ; S – переріз цієї частини, на яку діє сила F , m^2 ; σ – механічна напруженість, Pa ; $\sigma_{\text{дон}}$ – припустима механічна напруженість, при меншій або рівній якій забезпечується механічна міцність, Pa .

Для кращого розуміння суті послідовності розрахунків і кращого запам'ятовування виразів наведені аналогії між величинами електричного кола, магнітного кола та вентиляції, нагрівання та механічних. Ця аналогія показана у табл. 1.1.

З такого порівняння стає зрозуміло, чому деякі закони електротехніки розповсюджують на інші розділи проектування. Наприклад, закон Ома для магнітного кола має вигляд (1.10), для нагрівання – вирази (1.17) та (1.18), для механічних – (1.19).

Дещо специфічний цей закон для вентиляційних розрахунків (1.13).

Таблиця 1.1 – Аналогія між електромагнітними та іншими величинами

Величини				
електричні	магнітні	вентиляційні	теплові	механічні
U	F	H	$\Delta\theta$	F
I	Φ	V	Q	σ
R	R_μ	Z	R_λ і R_α	S

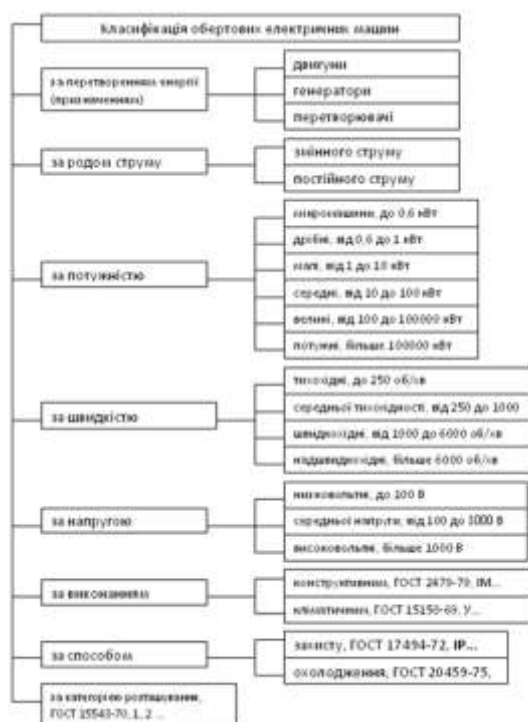
Закони Кірхгофа для електричних кіл розповсюджується на всі етапи розрахунків.

Наведені аналогії дозволяють складати схеми заміщення для магнітних кіл, вентиляційних та теплових розрахунків. В таких схемах заміщення, як правило, для сталих процесів використовують для розв’язання закони електротехніки.

1.2. Класифікація обертових електричних машин

Запропонована класифікація обертових електричних машин (ЕМ) [1] наведена в табл. 1.2. Необхідність класифікації викликана тим, що при проектуванні ЕМ, слід враховувати індивідуальні особливості ЕМ. До них відносять вимоги до: призначення (або напряму перетворення енергії), роду струму, потужності, частоти обертання, напруги живлення і т.і. Перелік цих вимог обумовлює вибір конструкції проектованої ЕМ, особливості процесу проектування і, в кінцевому підсумку, її техніко-економічні показники.

Таблиця 1.2 – Класифікація обертових електричних машин



Наприклад, кількістю витків (МРС) послідовної обмотки збудження відрізняються у двигуні постійного струму від генератора постійного струму. Призначенням і опорами к.з. обмотки, що розташовуються в полюсних «башмаках» (наконечниках полюсів), відрізняються синхронні двигуни від синхронних генераторів. Специфічну конструкцію мають однакірні перетворювачі частоти і напруги.

Рід струму впливає на вибір конструкції ЕМ: постійного або змінного струму.

Необхідні величини потужностей, частот обертання і напруги обумовлюють вибір конструкції, електромагнітних навантажень, типів ізоляції, систем вентиляції та охолодження. Наприклад, турбогенератори 200, 300, 500 і 800 *МВт* мають безпосереднє охолодження газом (воднем) або водою (дистильованою) провідників і сталі магнітопроводу статора. Частота обертання двополюсних турбогенераторів (3000 *об/хв*) обмежує діаметр ротора, його діаметр не перевищує 1200 *мм* з міркувань механічної міцності. За вимогами механічної міцності у надшвидкохідних асинхронних двигунах з к.з. ротором (150000...200000 *об/хв*) для змотування (намотування) ниток в текстильній промисловості ротор розміщують в сталеву втулку.

Величина напруги проекрованої машини (найбільше $\approx 25 \text{ кВ}$) вимагає відповідних розмірів ізоляції, причому із зростанням напруги коефіцієнт заповнення паза міддю падає (від 0,4 і нижче), вартість застосовуваної ізоляції високовольтних ЕМ може досягати 20-25% від усієї вартості машини.

При виборі конструкції та проведенні розрахунків необхідно враховувати умови експлуатації ЕМ, які зазвичай формулюються у вигляді вимог:

- за режимом роботи;
- за способом захисту;
- за категорією розташування;
- за кліматичним виконанням;
- за способом охолодження;
- за конструктивним виконанням.

Робочий режим (позначається літерою *S* і цифрою) характеризує тривалість і особливості навантаження. Наприклад, *S1*-режим сталого навантаження, коли двигун може працювати необмежений час і його нагрівання досягає певної постійної температури (сталого теплового режиму), *S2*-короткочасний; *S3*-повторно-короткочасний. Режим роботи регламентується міждержавним стандартом ГОСТ 183-74.

Ступінь захисту позначають латинськими літерами *IP* (International Protection) і двома цифрами. Перша цифра позначає ступінь захисту обслуговуючого персоналу від струмопровідних і обертових частин, наприклад 2 - позначає, що предмети діаметром більше 12 *мм* не потрапляють всередину машини і коробку виводів, 4 - предмети діаметром більше 1 *мм*, 5 - герметично закрита (пил не потрапляє в машину). Друга цифра позначає захист ЕМ від бризок води, наприклад, 3 - бризки під кутом 60° до вертикальної площини не потрапляють всередину струмопровідних і обертових частин, 4 - бризки під будь-яким кутом не потрапляють всередину машини.

Одночасно зауважимо, що базові конструкції асинхронних двигунів загального призначення з к.з. ротором серії 4А мають захист *IP44*, а серії АІ - *IP54*; частина шкали потужностей обох серій мають конструкції зі ступенем захисту *IP23*.

Види ступенів захисту і вимоги до них викладені в міждержавному стандарті ГОСТ 17494-72.

Під категорією розташування (позначають цифрами 1,2,...) розуміють місце розташування ЕМ при експлуатації. Наприклад, 1 - розташування на відкритому майданчику, 2 - під навісом і т.і. Позначення та опис розташувань наведені в міждержавному стандарті ГОСТ 15543-70.

Кліматичне виконання (позначають літерами) вказує мікрокліматичні умови, при яких використовують спроектовану ЕМ. Наприклад, У – помірний клімат, ХЛ - холодний, Т - тропічний і т.і. Перелік кліматичних виконань наведений у міждержавному стандарті ГОСТ 15150-69.

Необхідний або вибраний при проектуванні спосіб охолодження позначають ІС, далі літера і дві цифри. ІС - позначення, яке вказує що мова йде про систему охолодження (International Cooling), літера далі позначає вид охолоджуючого агента, наприклад: Н - водень, W - вода, А - повітря (часто літеру А пропускають) і т.і.

Перша цифра позначає пристрій кола охолодження, наприклад, 0 – вільна циркуляція охолоджуючого агента (повітря) вільно підводиться до машини з навколишнього середовища і повертається в це середовище, 4 - охолодження за допомогою зовнішньої поверхні, але первинний охолоджуючий агент циркулює по замкненій системі і віддає своє тепло через поверхню корпусу вторинному охолоджуючому агенту, яким є середовище, що оточує поверхню ЕМ (при цьому поверхня корпусу машини може бути гладкою або ребристою). Друга цифра позначає спосіб переміщення охолоджуючого агента, наприклад, 0 - вільна конвекція: рух охолоджуючого агента відбувається за рахунок різниці температур; 1 – самовентиляція, тобто переміщення охолоджуючого агента за рахунок вентилятора на валу (або лопаток на роторі). Повні відомості про застосовувані системах охолодження викладені в міждержавному стандарті ГОСТ 20450-7.

Конструктивне виконання позначають двома літерами ІМ та чотирма цифрами, які вказують на спосіб монтажу (розташування валу горизонтальне або вертикальне кріплення за допомогою лап або фланцеве, види підшипників та валів); наприклад, ІМ1011 - машина має лапи, горизонтальний вал, з двома підшипниковими щитами, одним циліндричним виконанням валу. Умовні позначення конструктивних виконань за способом монтажу і їх схематичні зображення наведені у міждержавному стандарті ГОСТ 2479-79, а виконання кінців вала - у стандарті ГОСТ 24807-81. У табл. 1.3 частково наведені умовні позначення конструктивних виконань електричних машин.

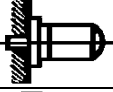
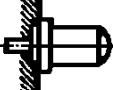
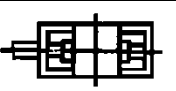
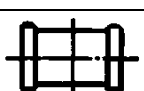
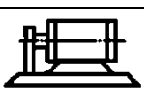
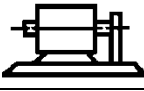
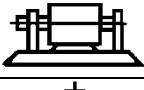
Перераховані вище класифікаційні ознаки, які наведені у табл. 1.3 є найбільш загальними. Однак, до спроектованої ЕМ можуть пред'являти загальноприйняті і додаткові вимоги, які викладаються у відповідних стандартах (наприклад, ГОСТ 183-74) або замовником в технічному завданні.

Знання загальних і конкретних вимог до ЕМ сприяє якісному проектуванню, правильному вибору конструкції і розмірів ЕМ, а на практиці - забезпечення необхідних техніко-економічних показників.

Таблиця 1.3 – Класифікаційні ознаки електричних машин

Форма виконання	Схематичне зображення	Характеристика
ІМ101Х		На лапах, з двома підшипниковими щитами

Таблиця 1.3 – Класифікаційні ознаки електричних машин

Форма виконання	Схематичне зображення	Характеристика
IM202X		На лапах, з вертикальним валом і двома підшипниковими щитами і фланцем на щиті
IM301X		Без лап, з фланцем на підшипниковому щиті з боку кінця вала
IM401X		Без лап, з фланцем на станині з боку кінця вала
IM501X		Вбудована машина, з двома підшипниковими щитами, з кріпленням за твірною зовнішньої поверхні сторони
IM533X		Вбудована машина, без станини і підшипникових щитів
IM602X		На лапах, з двома підшипниковими щитами і одним стояковим підшипником
IM621X		На лапах, з двома підшипниковими щитами і двома стояковими підшипниками
IM702X		На лапах, з одним стояковим підшипником
IM732X		На лапах, з двома стояковими підшипниками
IM813X		Вертикальна машина з підп'ятником, розташованим нижче ротора, і направляючим підшипником
IM823X		Вертикальна машина з підп'ятником, розташованим вище ротора, і направляючим підшипником

Примітка до табл. 1.3. X - виконання кінців валу (0...8): 0 - без кінця валу, 1 - з одним циліндричним, 2 - з двома циліндричними, 3 - з одним конічним, 4 - з двома конічними, 5 - з одним фланцевим, 6 - з двома фланцевими, 7 - з фланцевим з боку приводу і циліндричним на протилежній стороні; 8 - всі інші виконання.

1.3. Послідовність розрахунків при проектуванні ЕМ

Нижче наведені основні етапи проектування ЕМ.

1.3.1. Вихідні дані для проектування

Початком проектування ЕМ можна вважати вивчення вихідних даних, які подані замовником у вигляді технічного завдання (ТЗ) або технічних вимог (ТВ). ТЗ і ТВ повинні містити вимоги, які не суперечать існуючим стандартам, наприклад, міждержавному стандарту ГОСТ 183-74.

У тих випадках, коли замовник подав недостатній перелік вимог, проектува-

льник повинен уточнити умови експлуатації і самостійно внести додаткові вимоги з урахуванням рекомендацій стандартів.

У загальному випадку вихідні дані для проектування містять такі показники:

- номінальна потужність;
- номінальна напруга (лінійна);
- коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні, ККД;
- коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні, $\cos \varphi$;
- номінальна частота обертання;
- інші, які важливими вважає замовник.

Перераховані показники достатні для визначення електромагнітної (або розрахункової) потужності, і до них обов'язково додають вимоги експлуатації (наприклад, ступінь захисту, режим роботи і т.і.).

1.3.2. Вибір основних розмірів

Межі існування (працездатності) ЕМ досить великі, але межі, в яких виконуються поставлені вимоги (задовольняється функція мети), значно менше. У зв'язку з цим обґрунтований вибір основних розмірів ЕМ (діаметра якоря і розрахункової довжини пакетів магнітопроводу) істотно зменшує кількість варіантів розрахунку, або звужує межі пошуку варіанту, який задовольняє функції мети (відповідають вимогам технічного завдання).

З викладеного випливає, що проектування ЕМ вимагає багатоваріантних розрахунків з метою знаходження найбільш прийняттого (запланованого) варіанту.

Вибір основних розмірів починають з визначення величини електромагнітної (розрахункової) потужності проектованої ЕМ

$$S_{em} = m \cdot E_1 \cdot I_1, \quad (1.20)$$

яка є потужністю, що передається в ЕМ через повітряний проміжок за допомогою електромагнітних полів, або взаємодії струму якоря з сумарним магнітним потоком в повітряному проміжку.

Далі використовують відомий вираз зв'язку величини електромагнітної потужності з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями і частотою обертання

$$S_{em} = k \cdot (D^2 \cdot L_\delta) \cdot (A \cdot B_\delta) \cdot n, \quad (1.21)$$

у якому величина коефіцієнта k залежить від типу ЕМ і властивостей обмотки якоря (або статора асинхронних машин).

Використовуючи (1.21), визначають основні розміри, але у всіх випадках необхідно задати наперед величини електромагнітних навантажень: A - лінійне навантаження, A/m , і B_δ - індукцію у повітряному проміжку, $Tл$. Рекомендації з вибору величин A і B_δ наведені в [1, 2, 3].

Цілком зрозуміло, що A і B_δ істотно впливають на основні розміри, тому вдалий їх вибір впливає на тривалість процесу проектування.

Використовуючи прийняті величини A і B_δ визначають основні розміри ЕМ за допомогою:

сталої Арнольда;
універсальної електромашинної сталої;
вимог існуючих стандартів;
даних прототипу.

Постійна Арнольда [1, 3] дозволяє визначити величину умовного об'єму активної частини

$$(D^2 \cdot L_{\delta}) = C_A \cdot \frac{S_{em}}{n}, \quad (1.22)$$

де C_A - постійна Арнольда; n - синхронна частота обертання для ЕМ змінного струму і номінальна для ЕМ постійного струму.

Задаючись співвідношенням D/L_{δ} , використовуючи рекомендації або дані прототипу, знаходять чисельні значення D і L_{δ} .

Універсальна машинна стала C_S дозволяє безпосередньо визначити полюсну поділку ЕМ, а потім і D . За заданим співвідношенням D/L_{δ} , визначають L_{δ} .

Особливістю використання універсальної електромашинної сталої C_S є те, що вона придатна для визначення основних розмірів ЕМ з відкритими або напіввідкритими пазами (обмотки жорсткі або стрижневі).

Необхідність економного розкрою листів електротехнічної сталі для статорів ЕМ змінного струму і якорів ЕМ постійного струму фіксується вимогами стандартів. Ці стандарти рекомендують зв'язок між висотою осі обертання і зовнішнім діаметром статора, а в ЕМ великих потужностей зв'язок між габаритом і зовнішнім діаметром. Наприклад, міждержавний стандарт ГОСТ 13267-73 встановлює зв'язок між висотою осі обертання і зовнішнім діаметром статора ЕМ змінного струму, а Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) – рекомендує зв'язок між потужністю і висотою осі обертання. По рекомендованим співвідношенням [1, 2, 3] діаметрів розточки (тобто основного розміру) до зовнішнього визначають величину D по відомому зовнішньому діаметру.

У ЕМ постійного струму зовнішній діаметр ротора (якоря) є основним - D . Розрахункову довжину магнітопроводу L_{δ} в цьому випадку визначають з використанням виразу (1.21), або через рекомендоване співвідношення D/L_{δ} .

Вибір одного з основних розмірів з використанням даних прототипу здійснюють у випадках, коли виникає необхідність спроектувати ЕМ, близьку за потужністю і з тією ж або іншою частотою обертання, що і існуюча ЕМ. При цьому істотно дешевше виготовлення за рахунок максимального застосування уніфікації. У цьому випадку зазвичай приймають діаметр D прототипу, а L_{δ} визначають через вираз (1.21).

Особливо слід відзначити, що у загальному випадку основні розміри, розраховані на цьому етапі проектування, є попередніми. Вони можуть бути змінені (найчастіше D залишають постійним). Остаточні прийняті D і L_{δ} - це розміри, які задовольняють найкращим чином техніко-економічні вимоги до ЕМ.

1.3.3. Проектування обмотки і зубцевої зони

Цей етап по суті реалізовує величину лінійного навантаження A , яка була прийнята при визначенні основних розмірів, відповідних, в свою чергу, величині розрахункової потужності S_{em} .

Перед початком розрахунку необхідно визначитися з типом і конструктивним виконанням обмотки, а потім розрахувати і прийняти кількість зубців, яке повинно відповідати вимогам: можливості виконання обмотки і якості віброакустичних властивостей.

Через прийняту раніше величину A , струм паралельної вітки та зубцевий крок визначають кількість провідників у пазу, а для перевірки можливості розміщення їх розраховують розміри пазу. При розрахунках розмірів паза використовують раніше прийняте значення індукції в повітряному проміжку B_δ та прийняті за рекомендаціями величини індукції в зубцях $B_{\delta 1(2)}$ і ярмах $B_{j1(2)}$. Після вибору (попереднього) розмірів пазу здійснюють перевірку розміщення провідників, переріз яких вибирають, задаючись густиною струму, а конструкцію і розміри ізоляції паза приймають за специфікаціями [1, 2, 3].

Якщо умови розміщення провідників в пазу виконані, то далі розраховують крок обмотки по пазах, обмотувальний коефіцієнт і кількість витків в паралельній вітці (або послідовно з'єднаних в фазі).

Через відому величину ЕРС

$$E = k_E \cdot U_n \quad (1.23)$$

і ефективну кількість провідників знаходять магнітний потік і уточнену величину індукції в повітряному проміжку B_δ .

Варто зауважити, що добуток уточнених величин A і B_δ , дорівнює добутку раніше заданих, а відхилення кожної складової при цьому не повинно перевищувати $\pm 5\%$.

1.3.4. Розрахунок магнітного кола

Метою розрахунку магнітного кола є визначення струму збудження (або намагнічування), що створює необхідну величину МРС для отримання необхідної величини магнітного потоку, щоб забезпечити необхідну розрахункову потужність (1.1).

В основі розрахунку лежить закон повного струму

$$F = i \cdot w = \oint H \cdot dl, \quad (1.24)$$

який для ЕМ представляють у вигляді

$$F = I_0 \cdot W = \sum_{i=1}^{i=k} H_i L_i, \quad (1.25)$$

де $H_i L_i$ - падіння магнітного потенціалу на i -тій ділянці магнітного кола ЕМ.

Слід зазначити, що розміри виділених ділянок магнітного кола вже повинні бути визначені і відомі.

Величини H_i знаходять з використанням уточненої величини індукції в повітряному зазорі B_δ .

Визначивши величину сумарної МРС (уздовж силової магнітної лінії), знаходять струм збудження (струм намагнічування) на пару полюсів.

Для синхронних машин і машин постійного струму, задаючись значеннями 0,5; 1,0; 1,15; 1,2 E_1 (або E_a), визначають відповідний струм збудження і будують залежність $E = f(I_0)$, тобто криву намагнічування ЕМ, або неробочого ходу. Ці залежності використовують для графоаналітичної побудови очікуваних експлуатаційних характеристик.

1.3.5. Розрахунок втрат у сталі магнітного кола

Втрати в сталі визначають за відомих масах ділянок магнітного кола ЕМ і розрізняють основні і додаткові. Основні втрати викликані перемагнічуванням сталі магнітопроводу (втрати на гістерезис) і вихровими струмами від основного (взаємоіндукції) потоку. На практиці ці втрати знаходять за відомих величинам індукції, частоти і питомих втрат. Питомі втрати $p_{\text{нм}}$ задаються таблицями, величини яких отримані експериментальним шляхом.

До додаткових втрат відносяться втрати, викликані вищими гармоніками магнітного потоку. Їх розрізняють: поверхневі і пульсаційні. Ці втрати розраховуються за емпіричними формулами.

1.3.6. Розрахунок робочих параметрів

Під параметрами в цьому підрозділі розуміють активні та індуктивні опори ЕМ. У загальному випадку до них відносять:

- активні опори якоря і вторинної обмотки;
- індуктивні опори взаємоіндукції;
- індуктивні опори розсіювання якоря і вторинної обмотки;
- омичний опір обмоток збудження.

Як правило, ці параметри відносять до сталого режиму і розраховують для конкретних ЕМ за рекомендаціями [1, 2, 3].

Необхідність розрахунку перерахованих параметрів необхідна для визначення й порівняння експлуатаційних властивостей ЕМ в робочому діапазоні.

1.3.7. Розрахунок робочих характеристик

Показники ЕМ в робочому діапазоні навантажень розраховують:

- за схемами заміщення (асинхронні ЕМ);
- графо-аналітично (синхронні, постійного струму ЕМ).

Раніше визначені параметри використовують в схемах заміщення асинхронних ЕМ, за якими, задаючись ковзанням, визначають експлуатаційні характеристики в робочому діапазоні.

При графоаналітичних побудовах використовують як деякі параметри, так і характеристики неробочого ходу і короткого замикання (ЕМ синхронні, постійного струму).

Необхідність розрахунку показників ЕМ в номінальному режимі (ККД, $\cos\phi$, ковзання і т.д.) обумовлена поставленими вимогами до ЕМ в ТЗ або ТВ. Якщо показники не відповідають вимогам, то необхідно внести відповідні зміни і повторити розрахунки з початку того розділу, який забезпечує необхідні показники.

1.3.8. Розрахунок перехідних режимів

До таких режимів відносять: пуски асинхронних, синхронних та постійного струму двигунів, раптові к.з. в генераторах.

У кожному конкретному випадку пропонують методику розрахунку в [1, 2, 3]. Наприклад, в асинхронних двигунах пускові характеристики розраховують за схемою заміщення, причому для кожного заданого значення ковзання уточнюються параметри в ній.

Необхідність проведення розрахунків перехідних процесів обумовлюються вимогами ТЗ або ТВ. Наприклад, в асинхронних двигунах – вимогами до величин пускових струму і моменту, а також до величини максимального моменту.

Якщо вимоги не виконуються, то процес проектування ЕМ повторюють з внесенням потрібних поправок.

1.3.9. Тепловий і вентиляційний розрахунки

При виконанні вимог ТЗ або ТВ за технічними показниками (ККД, $\cos\phi$, і т.і.) проводять оцінку теплового стану ЕМ.

Тепловий стан ЕМ визначають ступенем нагрівання (температурою), при якій забезпечується термічна міцність, що залежить від класу нагрівостійкості ЕМ.

Слід зазначити, що вентиляційний і тепловий розрахунки взаємопов'язані.

Метою вентиляційного розрахунку є забезпечення мінімально-необхідних витрат повітря вентилятором, при якому над охолоджуваними поверхнями має місце певна швидкість переміщення повітря, яка зумовлює охолодження ЕМ.

За відомими швидкостями руху повітря над охолоджувальними поверхнями в тепловому розрахунку визначають коефіцієнти теплопередачі з поверхонь. В основному ці коефіцієнти теплопередачі обумовлюють ступінь нагрівання (або перегріву над навколишнім середовищем) машини.

Якщо оцінка теплового стану незадовільна, то необхідно збільшувати витрату повітря шляхом зміни або розмірів вентилятора, або змінювати систему вентиляції з подальшим розрахунком швидкості руху повітря над охолоджуваними поверхнями.

1.3.10. Механічні розрахунки

Механічні зусилля в ЕМ створюються як у процесі виготовлення, так і у про-

цесі експлуатації. У зв'язку з цим потрібна оцінка механічної міцності конструкції ЕМ.

Пресування пакетів магнітопроводу у процесі виробництва ЕМ вимагає перевірки на механічну міцність натискних шайб і пальців (на вигин), запірних шпонок (на зріз), пресуючих втулок (на зсув). Перевірка конкретного елемента залежить від застосовуваної конструкції кріплення.

У процесі обертання в елементах конструкції ротора виникають відцентрові зусилля, що діють, наприклад, на провідники обмотки, клини пазів і т.п.

При номінальному навантаженні створений момент обертання діє як на ротор, так і на статор. У зв'язку з цим потрібна перевірка кріплення магнітопроводу і навіть фундаментних болтів на міцність.

Електродинамічні зусилля при раптових к.з. прагнуть відігнути лобові частини обмоток статора і ротора в протилежні боки. У цьому випадку на лобові частини статорних обмоток розташовують бандажні кільця, а на роторі встановлюють обмоткотримачі. Ці елементи конструкції підлягають перевірці на механічну міцність.

Особливо слід відзначити необхідність перевірок на механічну міцність валів ЕМ, на які діють, крім відомих зусиль, зусилля одностороннього магнітного притягання, а також потрібна перевірка на критичну швидкість.

Як видно з неповного переліку елементів конструкції ЕМ, що підлягають перевірці на механічну міцність, обсяг розрахунків значний. Його скорочують за рахунок існуючих рекомендацій [1, 2, 3].

У разі невиконання вимог щодо механічної міцності будь-якого з елементів конструкції необхідно вживати заходів до посилення міцності конструкції.

1.3.11. Економічний розрахунок

Точний економічний розрахунок утруднений у зв'язку з коливаннями ринкових цін.

Зазвичай, в процесі проектування більш точно можна розрахувати і оцінити вартість активних і частково конструктивних матеріалів.

У загальному випадку в економічну оцінку спроектованої ЕМ входить собівартість, куди включають вартість матеріалів, трудові витрати, загальнозаводські витрати і суму прибутку.

Сума собівартості нижче ринкової вартості.

Остаточно спроектований варіант ЕМ повинен мати мінімальну вартість, за умови виконання інших вимог функції мети.

1.3.12. Графічна документація

Для остаточно вибраного варіанту спроектованої ЕМ складаються робочі креслення згідно з вимогами міждержавної системи стандартів ЕСКД та стандартів України (ДСТУ).

Робочі креслення передають на завод, де за ними виготовляють спроектовані ЕМ.

1.4. Короткий огляд матеріалів, що застосовуються у електричних машинах

На стадії проектування повинні бути обрані конкретні види матеріалів, які забезпечують надійність у роботі, необхідні показники і економічність в процесі виробництва спроектованої електричної машини.

В загальному випадку матеріали, які використовують в електричних машинах, можна розділити на:

- магнітні (для магнітопроводів);
- провідникові (для різних обмоток);
- ізоляційні (для листів електротехнічної сталі і струмоведучих частин);
- конструкційні.

1.4.1. Магнітні матеріали

До них відносяться електротехнічні сталі. Назва «електротехнічні» дана тому, що її використовують для магнітопроводів електричних машин з метою концентрації величини магнітного потоку в зоні перетворення енергії (в повітряному проміжку). Вона відрізняється від інших типів легованих (тобто з певними добавками речовин і елементів) тим, що в сталь додають кремній для зменшення втрат на вихрові струми шляхом збільшення її питомого електричного опору. Однак, зі збільшенням у електротехнічній сталі вмісту кремнію зростає магнітний опір (зменшується магнітна проникливість) і її крихкість.

Для зниження втрат на вихрові струми в змінних магнітних полях магнітопроводи набирають з окремих листів (шихтують). Товщина цих листів: 0,28; 0,3; 0,35 і 0,5 мм.

Необхідні розміри листа сталі магнітопроводу штампують з:

- листів (максимальні розміри 1000x2000 мм);
- рулонів (найбільша ширина 1000 мм).

При необхідності використовують листи менших розмірів, а рулонну сталь розрізають (або постачають) з меншою шириною у вигляді стрічки.

Особливості виготовлення, характеристики та властивості електротехнічних сталей вказують у позначенні, що складаються з чотирьох цифр - XXXX.

Перша цифра позначення вказує вид прокатки та структурний стан і може бути одиницею, двійкою або трійкою:

- 1 - гарячекатана ізотропна;
- 2 - холоднокатана ізотропна;
- 3 - холоднокатана анізотропна з ребровою структурою.

Друга цифра позначення вказує вміст кремнію і характеризує 6-ть груп (від 0 до 5). Найбільш поширені в електромашинобудівництві:

- 1 - з вмістом кремнію від 0,4 до 0,8% (сталь легована);
- 2 - з вмістом кремнію від 0,8 до 1,8% (середньолегована);
- 3 - з вмістом кремнію від 1,8 до 2,8% (підвищеного легування).

Третя цифра характеризує нормовану величину (всього 5 груп), що вказує гарантовані втрати в одиниці маси сталі при відомій величині індукції або величину індукції в залежності від конкретної величини питомої напруженості магнітного по-

ля. В електричних машинах зазвичай використовують:

- гарантована величина питомих втрат (Bm/kg) при індукції 1 Тл і частоті 50 Гц ($P_{1/50}$);

- те ж при індукції $1,0$ або $1,5\text{ Тл}$ і частоті 400 Гц ($P_{1/400}$).

Четверта цифра вказує порядковий номер сталі у групі.

У позначеннях електротехнічної сталі, яка поступає на електротехнічний завод, вказують: товщину, розміри, точність прокатки («Н» - нормальне, «П» - підвищеної точності); термічний стан («Т» - травлена, «НТ» - не травлена поверхні); клас не площинності (цифровий); ізоляційне покриття («ЕТ» - термостійке, «Е» - не термостійке покриття, «Б» - без покриття).

Статори і ротори електричних машин шихтують з листів електротехнічних сталей товщиною $0,5\text{ мм}$. Найбільш поширені марки:

- 2013 - холоднокатана ізотропна для серійних асинхронних двигунів з висотою обертання $40\dots132\text{ мм}$ (нелегована, з менш $0,4\%$ вмістом кремнію);

- 2213 - холоднокатана ізотропна для тих же типів двигунів з висотою осі обертання $160\dots180\text{ мм}$ (середньолегована, $0,8\dots1,8\%$ вмістом кремнію);

- 1312 - гарячекатана для усіх типів двигунів з висотою осі обертання $280\dots355\text{ мм}$ (підвищеного легування з $1,8\dots2,8\%$ вмістом кремнію).

Особливо слід зауважити, що питомі втрати (Bm/kg) в холоднокатаній ізотропній сталі менші ніж в гарячекатаній при тих же величинах індукції $B(\text{Тл})$. Анізотропна холоднокатана має нижчі питомі втрати ніж ізотропна. Однак, вартість одного кілограма гарячекатаній сталі менша.

В тих частинах магнітопроводу, де має місце постійний за величиною магнітний потік використовують: технічне залізо (вміст вуглецю не більше $0,4\%$), вуглецеві сталі і чавуни. З них виготовляються станини (ярма) машин постійного струму і ободи (ярма) великих тихохідних синхронних машин. Для цього використовують листи з подальшим електрозварюванням або лиття.

Полюса машин постійного струму виконують зі сталі 1211 завтовшки від $0,5$ до 1 мм з метою зменшення втрат від поперечних і повздовжніх пульсацій магнітного потоку.

Полюса явнополюсних синхронних машин виготовляють з листів сталей товщиною $1\dots2$ і більше міліметрів.

Особливе місце в матеріалах магнітного ланцюга машин займають постійні магніти, які не тільки проводять магнітний потік, а й створюють його. Зазвичай, постійні магніти застосовують в якості полюсів в машинах постійного струму, синхронних і спеціальних невеликих потужностей і мікромашинах.

1.4.2. Провідникові матеріали

Обмотки електричних машин виконують провідниками, які ізолюють.

Обмотки статорів асинхронних і синхронних машин, фазних роторів асинхронних машин, якорів (роторів) машин постійного струму та обмоток збудження виконують з міді, яка має малий питомий електричний опір. Крім того, мідь використовують для виготовлення колекторних пластин.

Провід виготовляють шляхом волочіння до діаметра $0,5\text{ мм}$ та стрічки до

10 мм. Розміри діаметрів круглого і прямокутного проводів задають у вигляді таблиці-сортаменту.

Для проводів застосовують електролітичну відпалену мідь з питомим електричним опором при температурі 20° - $\rho_{20} = (1.724 \dots 1.754) \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м}$ з питомою масою 8,9 г/см³ або 8,9 т/м³.

Для пускових і заспокійливих обмоток синхронних явнополюсних машин застосовують стрижні: мідні, латунні (мідь+цинк) та бронзові (мідь+фосфор+берилій+кадмій).

Пластини колекторів у машинах постійного струму виготовляють з твердотягнутої міді з присадкою (домішкою) кадмію, що сприяє підвищенню міцності міді (від стирання), покращує провідність контактів щітки - поверхня колектора та комутацію.

Порівняно висока електрична провідність (питомий опір алюмінію $\rho \approx \sqrt{3}$ разів більший міді), мала ціна і питома маса, низька температура плавлення і висока пластичність, дуже тонка плівка окису на поверхні, яка захищає алюміній від корозії, дозволило застосовувати алюміній для проводів і струмопровідних сплавів.

Рафінований алюміній (99,5% алюміній і 0,5% домішок заліза і кремнію) має питомий електричний опір при температурі 20° - $\rho_{20} = 2.82 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м}$, з питомою масою - (2,6...2,7) т/м³.

Литі короткозамкнені обмотки роторів асинхронних машин виконують з алюмінієвих сплавів. В залежності від виду виготовлення короткозамкнені обмотки виконують із сплавів АЛ2 і АЛ9 (при заливці), АК3, АКМ4 - 4 (при литті під тиском), АК10, АКЦ11 - 12 (при литті відцентровому або під тиском).

Короткозамкнені обмотки асинхронних двигунів потужністю понад 400 кВт виконують з алюмінієвих шин, зварюються по торцях з короткозамкненим кільцем.

Матеріали магнітопроводу і провідників обмоток, які беруть участь в перетворенні енергії, називають активними. Відношення маси активних матеріалів до перетвореної потужності - один з найважливіших показників спроектованої електричної машини.

1.4.3. Ізоляційні матеріали

В основному цей вид матеріалів пов'язаний з активними матеріалами, застосування яких без ізоляції неможливо. Тому у вартість активних матеріалів включають вартість ізоляції, яка в потужних високовольтних машинах може становити 25% загальної вартості.

За місцем застосування в електричних машинах ізоляцію можна розділити на три групи:

- для листів електротехнічної сталі магнітопроводів;
- для провідників обмоток;
- для усунення неприпустимих гальванічних контактів в окремих частинах конструкції машин.

До використовуваної в проектованій машині ізоляції пред'являють вимоги:

- міцність (електрична, термічна і механічна);

- технологічність (найбільш проста технологія при виготовленні);
- економічність (найнижча вартість).

Ці вимоги взаємно суперечливі, що змушує проектанта приймати компромісні рішення: використовувати шари ізоляції з різними властивостями.

Використовувані конструктивні типи ізоляції електричних машин характеризуються різноманіттям. В узагальненому вигляді ці типи представлені на рис. 1.1.

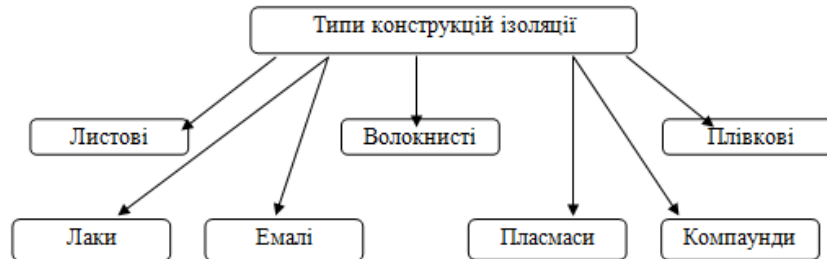


Рис. 1.1. – Типи ізоляції електричних машин

1.4.3.1. Ізоляція листів магнітопроводу

Для запобігання гальванічного контакту між листами електротехнічної сталі магнітопроводу їх ізолюють для зниження втрат від вихрових струмів в змінних полях. В якості ізоляції використовують лаки або термостійке покриття (оксидування).

Ізоляція листів призводить до зменшення коефіцієнта заповнення сталі k_c , який ще залежить від товщини листів, сили пресування і навіть довжини пакета магнітопроводу. У табл. 1.4 дані усереднені величини k_c в залежності від товщини листів і виду ізоляції.

Листи магнітопроводу ротора асинхронних машин з короткозамкненим ротором товщиною 0,5 мм, зазвичай, неізолювані і коефіцієнт заповнення приймають рівним 0,95 ($k_c = 0,95$)

Таблиця 1.4 – Значення k_c від товщини листів і виду ізоляції

Товщина листа, мм	Вид ізоляції листів	
	Оксидування	Покриття лаком
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

1.4.3.2. Ізоляція обмотувальних проводів

Вимоги до ізоляції провідників стисло подані на рис. 1.2. Докладно ці вимоги розглянуті далі.



Рис. 1.2. – Вимоги до ізоляції провідників

Вибір матеріалу ізоляції обмотувального проводу залежить від:

- необхідного класу нагрівостійкості;
- виду ізоляції (емалева, плівкова, волокниста);
- геометрії провідника (круглий, прямокутний).

Поєднання цих характеристик визначає марку обмотувального проводу.

В основному електричні машини проектують і виготовляють з класами нагрівостійкості «В» і «F», рідше - «H». Максимальні температури нагріву і характеристики матеріалів цих класів нагрівостійкості наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Нагрівостійкість ізоляційних матеріалів (згідно міждержавного стандарту ГОСТ 8865-70)

Клас нагрівостійкості	Температура, °C	Характеристика основних груп електроізоляційних матеріалів, які відповідають даному класу нагрівостійкості.
В	130	Матеріали на основі слюди (у тому числі на органічних підкладках), азбесту і скловолокна, що використовують разом з органічними зв'язуючими і просочуючими складом, інші поєднання з матеріалами органічного походження.
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, що використовують в поєднанні з кремнійорганічними зв'язуючими та просочуючими складом, кремнійорганічні еластomers, а також відповідні даному класу інші матеріали та поєднання матеріалів.
H	180	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, що використовують в поєднанні з синтетичними зв'язуючими та просочуючими складом, а також відповідні даному класу інші матеріали та поєднання матеріалів.

Всипні обмотки, що виконують в електричних машинах з круглого проводу до номінальної напруги 660 В, мають емалеву ізоляцію проводу, яка забезпечує порівняно високий коефіцієнт заповнення паза через малу двосторонню товщину. Найбільш наведені в табл. 1.6. Їх застосовують у машинах постійного струму потужністю до 30 кВт і до 100 кВт - у машинах змінного струму.

Таблиця 1.6 – Марки проводу для всипних обмоток

Марка проводу	Клас нагрівостійкості ізоляції	Тип емалевої ізоляції	Номінальні розміри струмопровідної жили, мм	Двостороння товщина ізоляції, мм
ПЕТВ-943	В	Високоміцна емаль на поліефірної основі (лак ПЕ-943)	0.063 – 2.50	0.025-0.09
ПЕТВ-939	В	Те ж (лак ПЕ-939)	0.063 – 2.50	0.025-0.09

Таблиця 1.6 – Марки проводу для всипних обмоток

Марка про- воду	Клас нагрів- остійкості ізоляції	Тип емалевої ізоляції	Номинальні розміри струмопровідної жили, мм	Двостороння тов- щина ізоляції, мм
ПЕТ-155А	F	Високоміцна емаль на поліефіроемідній основі	0.063 – 2.50	0.025-0.09
ПНЕТ-ІМІД	До 200°C	Високоміцна емаль на поліімідній основі (ніке- льована, мідний дріт)	0.10 – 1.32	0.025-0.06
ПЕТ-ІМІФ	До 200°C	Те ж (на оголеному мід- ному провіднику)	0.10 – 1.32	0.025-0.06

В машинах високовольтних і великих потужностей використовують шарувату ізоляцію (або спільно з емалевою) з метою підвищення електричної міцності між витками. У табл. 1.7 подані марки таких проводів, до речі прямокутні провідники використовують для жорстких і стрижневих обмоток. Обмотки високовольтних машин виконують проводами з класом нагрівостійкості «Н».

Таблиця 1.7 – Марки проводів з шаруватою ізоляцією

Найменування обмотувального проводу	Марка проводу	Клас на- грівос- тійкості	Номинальні ро- зміри провідної жили, мм	Двосторон- ня товщина ізоляції, мм	Пробивна напруга, В
Провід ізольований високомі- цною емаллю підвищеної на- грівостійкості і одним шаром обмотки з лавсанового волокна	ПЕТЛО	В	Круглі діа- метром 0.20–1.32	0.12 – 0.18	350
Провід, ізольований двошаро- вою обмоткою скловолокном з підклеюванням і просоченням кожного шару нагрівостійким лаком	ПСД	F	Круглі діа- метром 0.315–2.6 Прямокутні (0.9 – 5.6)х х(2.1 – 12.5)	0.23 – 0.33 0.27 – 0.4 0.32 – 0.38	450 – 650 550 – 650
Провід, ізольований двошаро- вою обмоткою скловолокном з підклеюванням і просоченням кожного шару кремнійор- ганічним лаком	ПСДК	Н	Те ж	0.23 – 0.33 0.27 – 0.4 0.32 – 0.38	450 – 650 550 – 650
Провід, ізольований двошаро- вою обмоткою стоншеними (трьохмікронним) скловолок- ном з підклеюванням і просо- ченням кожного шару	ПСДКТ	Н	Круглі діа- метром 0.315–2.12 Прямокутні (0.9 – 3.55)х х(2.12 – 10)	0.14 – 0.22 0.22 0.26 – 0.32	300 – 400 450
Провід, ізольований шаром кремнійорганічної емалі і од- ношаровою обмоткою стонше- ними (трьохмікронним) з під- клеюванням і просоченням кремнійорганічним лаком	ПЕТКС ОТ	Н	Круглі діа- метром 0.30–1.60 Прямокутні (0.85 – 1.40)х х(2.12 – 4.75)	0.14 – 0.16 0.20 – 0.22 0.18 – 0.2	350 350

1.4.3.3. Ізоляція окремих частин обмотки

У першу чергу до таких частин слід віднести все, що пов'язані з ізоляцією об-

моток. Класифікація ізоляцій обмоток по місцю розташування наведена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. – Класифікація ізоляції обмоток

Для зазначених на рис. 1.3 проміжків використовують ізоляційні матеріали:

- електротехнічний папір або картон;
- шарові матеріали (гетинакс, текстоліт, склотекстоліт);
- тканини (капірна стрічка, лакотканини, склотканини);
- клеєні (міканіт, мікафоліт, міколента).

Крім того, обмотки просочують компаундами і лаками для забезпечення механічної цілості обмотки, поліпшення охолодження (збільшують коефіцієнт її теплопровідності) і підвищення вологостійкості.

Вибір конкретних видів ізоляційних матеріалів залежить від вихідних вимог до машини і може бути зроблений відповідно до існуючих рекомендацій в літературі з проектування електричних машин.

Ізоляція необхідна між колекторними пластинами, колекторними пластинами і корпусам колектора. Для цих цілей використовують міканіти різної конструктивної форми і властивостей.

У великих синхронних машинах з підшипниками ковзання необхідна ізоляція однієї стійки підшипника від фундаментної плити, щоб виключити підшипникові струми, що руйнують поверхню ковзання підшипника. Тут, зазвичай, досить прокладки ізоляції типу електрокартону, гетинаксу або текстоліту.

1.4.4. Конструкційні матеріали

Матеріали вузлів і деталей, що кріплять активну частину машини (магнітопроводи, обмотки статорів і роторів), несуть механічні навантаження, забезпечують тепловідвід з машин і виконують ряд інших функцій, відносять до конструкційних.

Конструкційні матеріали ділять на три групи:

- чорні метали;
- кольорові метали;
- пластмаси.

До чорних металів відносять різні марки чавунів і сталей. Чавуни застосовують сірі марок С4 і ковкі, а сталі - литі та прокатні. Чавунне лиття використовують для станин, підшипникових щитів, натискних шайб і маховиків. Відмінною рисою кованого чавуну від сірого є його пластичність і підвищена зносостійкість.

Литі сталі марок 20Л35 і 45Л застосовують для виготовлення деталей з високими механічними навантаженнями. Наприклад, бочки роторів неявнополюсних синхронних машин, ободи роторів великих явнополюсних синхронних машин, втулок, підшипникові щити тягових і вибухозахищених машин. Одночасно литу сталь застосовують і як частину магнітного кола, де магнітний потік постійний по величині. Таким прикладом служать станини машин постійного струму і ободи синхронних машин.

Слід зазначити, що процес лиття дуже енерговитратний, тому лиття замінюють зварюванням, використовуючи прокатну сталь, яку виробляють у широкому асортименті.

При виготовленні електричних машин використовують прокатну сталь: листову, круглу, шестигранну і квадратну.

Листову сталь марки Ст3 використовують для полюсів і станин машин постійного струму, фундаментних плит, стояків підшипників, розпірок і інших деталей.

Круглу сталь застосовують для валів (марки Ст45), втулок та інших деталей.

З шестигранної сталі виготовляють болти, гайки і т.і., а квадратна сталь йде на виготовлення стрижнів, пальців, щіткотримачів і інших деталей.

Вуглецевий сталевий холоднокатаний дріт використовують для пружин щіткотримачів, запорів кришок і т.і.

З кольорових металів найбільш широко застосовується алюміній і його сплави з міддю і цинком. В залежності від виду лиття і конкретної конструкції використовують різні марки сплавів, які використовують для відливання корпусів, підшипникових щитів, вентиляторів та інших деталей. Для усунення ненадійності різьби в алюмінієвих деталях застосовують армування сталевими втулками.

РОЗДІЛ № 2. ПРОЕКТУВАННЯ ЯКІРНИХ ОБМОТОК ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1. Мета проектування якірних обмоток

При перетворенні енергії електричних машин можна умовно виділити три складових:

- електричну;
- магнітну;
- механічну.

В загальній формулі для електромагнітної (розрахункової) потужності

$$S_{EM} = K(D^2 l_{\delta})(AB_{\delta})n_1 \quad (2.1)$$

в явному вигляді задані електрична (через A - лінійну навантаження) і магнітна (через - індукцію у повітряному проміжку) складові. Механічна енергія в неявному вигляді задана синхронною частотою обертання магнітного поля n_1 (або номінальною частотою обертання якоря машин постійного струму - n_n). Звичайно, частоту обертання n задають і пов'язують з частотою напруги мережі або струму якоря, машин змінного струму, чи технічними вимогами до машин постійного струму.

При відомих величинах електромагнітної (або розрахункової) потужності, частоти обертання n і заданому попередньо лінійному навантаженні A та індукції B_{δ} визначають умовний об'єм активної частини і величини складових його: D - діаметр якоря і l_{δ} - розрахункову довжину якоря. Ці розміри, як відомо, при проектуванні вважають основними.

Конкретно спроектована електрична машина повинна мати розрахункову потужність (2.1), а значить мати прийняті величини A і B_{δ} , або обов'язково прийнятий їх добуток ($A \cdot B_{\delta}$).

У зв'язку з цим основна мета проектування якірних обмоток є забезпечення в спроектованій машині прийнятої раніше величини лінійного навантаження A . Слід відразу зазначити, що через дискретність кількості витків або провідників в пазу якоря величина A може дещо відрізнятись від прийнятої (зазвичай, не більше $\pm 5\%$ від прийнятого значення). При цьому автоматично зміниться уточнена індукція B_{δ} у той бік, при якому добуток уточнених величин ($A \cdot B_{\delta}$) залишиться рівним попередньо прийнятому.

Реалізація необхідного лінійного навантаження A забезпечується обмоткою якоря, яку відповідним чином проектують з урахуванням існуючих особливостей і вимог до спроектованої машини. При цьому слід зазначити, що існують як загальні правила при проектуванні обмоток, так і ряд специфічних особливостей, які коротко розглядаються нижче.

2.2. Конструктивні форми виконання обмоток якорів

Незважаючи на різноманітність конструкцій електричних машин, можна виді-

лити три конструктивні форми якірних обмоток:

- всипні з круглих провідників;
- жорсткі з прямокутних провідників;
- стрижневі з прямокутних провідників.

Окремо необхідно зазначити про існування і інших конструктивних форм обмоток, які не є якірними, але приймають обов'язкову участь в перетворенні енергії електричних машин:

- короткозамкнені, які широко застосовуються в машинах змінного струму;
- збудження, які, як відомо, обов'язково присутні в машинах постійного струму та синхронних.

Нижче розглядаються також конструкції і розташування короткозамкнених обмоток. Знайомство з місцем розташування і конструктивними формами обмоток збудження виноситься на самостійну роботу внаслідок їх простоти виконання і розрахунку.

2.2.1. Всипні обмотки

Всипні обмотки виконуються з круглого проводу і застосовують у машинах постійного струму потужністю до 30 кВт, в машинах змінного струму потужністю до 100 кВт напругою до 660 В.

Назва «всипні» обмотки отримали з урахуванням технології виготовлення: провідники розташовують (як би всипають) по одному в паз (рис. 2.1).

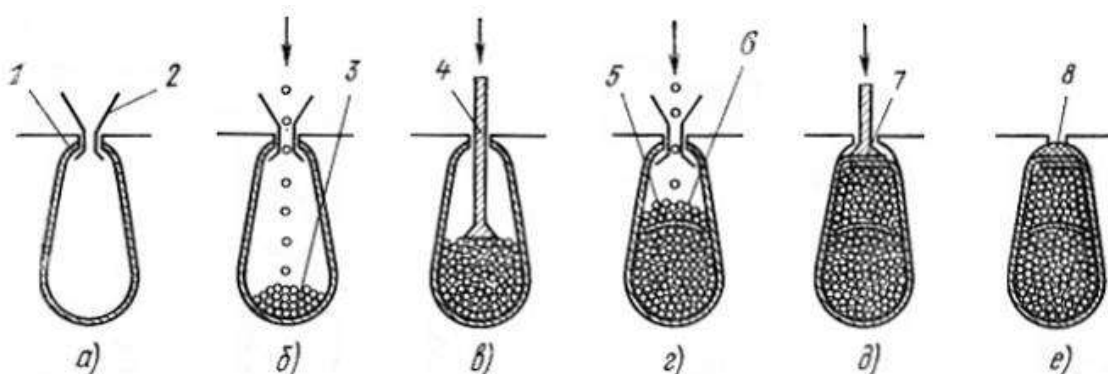


Рис. 2.1.

Процес виготовлення складають з:

- намотування котушок (секцій) на шаблонах (рис. 2.2);

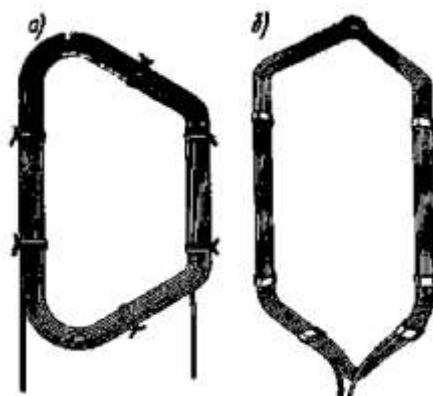


Рис. 2.2. а) шаблонна; б) петльова

- укладання у паз ізоляції у вигляді пазової коробочки (рис. 2.3);

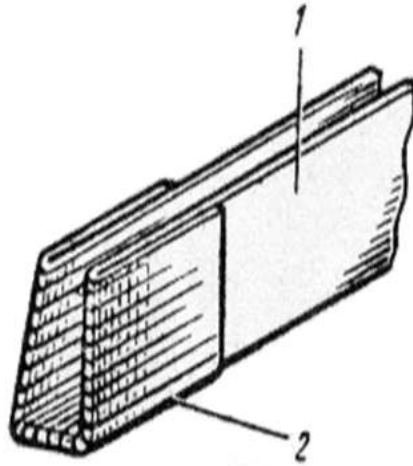


Рис. 2.3.

1 – ізоляція пазова (корпусна); 2 – манжет

- «всипання» по одному провіднику в паз (рис. 2.1);
- закриття паза клином (рис. 2.4, рис. 2.5);

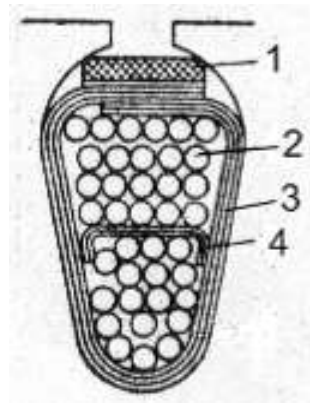


Рис. 2.4.

- 1 – клин; 2 – провідник; 3 – пазова ізоляція; 4 – міжшарова ізоляція
- просочування обмотки.

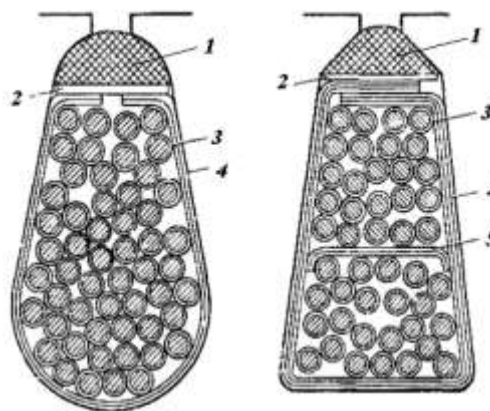


Рис. 2.5. а) одношарова обмотка; б) двошарова обмотка

1–клин; 2 – ізоляційна прокладка під клин; 3– провідник; 4 – пазова ізоляція;
5 – міжшарова ізоляція

Як видно з рисунків, для всипних обмоток застосовують напівзакриті овальні (грушоподібні) або трапецеїдальні пази. Напівзакритість паза дозволяє знизити ве-

личину коефіцієнта Картера (коефіцієнта повітряного проміжку), а значить знизити МРС повітряного проміжку. З цією метою всипні обмотки до потужностей 10...15 кВт виконують одношаровими (рис. 2.5а), а більших потужностей (до 100 кВт) – двошаровими (рис. 2.5б.).

Відкриття паза (або шліц) вибирають мінімально можливим з технічних міркувань:

$$b_{ш} = d_{із} + 2\Delta_{із} + \Delta_{доо} + \Delta, \quad (2.2)$$

де $d_{із}$ - діаметр ізолюваного проводу (звичайно не більше 1,4 мм); $\Delta_{із}$ - одностороння товщина пазової ізоляції ($\approx 0,2 \div 0,4$ мм); $\Delta_{доо}$ - допуск для проходження провідника через шліц; Δ - допуск на шихтовку ($0,1 \div 0,2$ мм).

Величина $b_{ш}$ в штампі залежить від висоти осі обертання і числа полюсів, задається за рекомендаціями і лежить в межах 1,8...4,0 мм.

Після прийнятих розмірів провідників обмотки і попередньо заданих розмірів паза здійснюється перевірка можливості розміщення потрібної кількості провідників обмотки в пазу. Це перевіряється через коефіцієнт заповнення паза провідниками

$$K_{зан} = \frac{d_{із}^2 \cdot n \cdot U_n}{S'_n}, \quad (2.3)$$

де $d_{із}$ - діаметр ізолюваного елементарного провідника; n - кількість елементарних

провідників в одному ефективному $n = \frac{q_{ефф}}{q_{ел}} = \frac{i_a}{j_{np} \cdot q_{ел}}$; U_n - кількість ефективних

провідників в пазу (по яких протікає струм паралельної вітки); S'_n - площа паза під провідники (тобто без пазової ізоляції, клина, допуску на шихтовку та міжшарову ізоляцію, якщо така присутня у пазу).

Величина цього коефіцієнта при укладці обмотки не повинна перевищувати:

- $K_3 \leq 0,7$ - для автоматичної або механічної;
- $K_3 \leq 0,75$ - для ручної.

Однак слід зауважити, що зниження цього коефіцієнта більш ніж на 0,03...0,05 для наведеного способу укладання свідчить про низьку якість спроектованого паза: не повністю використана площа паза під провідники, що призводить до збільшення маси сталі магнітопроводу і габаритів машини.

В цьому випадку слід провести перерахунок розмірів паза. Так само слід чинити і при значеннях K_3 вище зазначених меж (обмотку не можна розмістити у пазу).

До переваг всипних обмоток відносять:

- можливість автоматизації та механізації процесу виготовлення і укладання;
- високий коефіцієнт заповнення паза міддю (відношення чистого перерізу міді паза до всієї площі паза у світлі) через невеликі товщини плівкової або емалевої ізоляції провідників;
- невелика величина коефіцієнта Картера внаслідок відносно малої ширини шліца, порівняно з іншими типами обмоток;
- відносно невеликі додаткові втрати (поверхневі і пульсаційні) в сталі через зменшену ширину шліца.

До недоліків всипних обмоток відносять:

- застосування обмотки тільки для напруг до 660 В включно;
- застосування для машин великих потужностей (більше 100 кВт для машин змінного струму) обмежується через недостатню механічну міцність лобових частин (неприпустимий відгин в сторону якоря при раптових к.з.);
- відсутність вентиляційних каналів між провідниками лобових частин, що ускладнює охолодження їх і машини в цілому, а це змушує знижувати густину струму, що обумовлює в кінцевому підсумку до збільшення габаритів машини, коефіцієнт скорочення кроку одношарової обмотки дорівнює одиниці.

2.2.2. Жорсткі обмотки

Жорсткі обмотки виготовляють з прямокутного проводу у машинах постійного струму потужністю понад 30 кВт і змінного струму - понад 100 кВт та з відкритими або напіввідкритими пазами. Прямокутні провідники забезпечують значну механічну міцність лобових частин, яку підвищують зв'язуванням (бандажировкою) сусідніх котушок кіперною стрічкою або склочулком. При великих вильотах лобових частин у машинах потужністю більш 100 кВт використовують бандажні кільця (металеві, одне або два, накладених на зовнішню поверхню лобових частин обмоток), які скріплюють з котушками, чим забезпечують необхідну механічну міцність при раптових к.з.

Обмотки виготовляють наступним чином:

- намотують на шаблонах котушки з необхідним числом витків w_k в ній, таку котушку називають «човник»;
- на намотаний човник накладають ізоляцію чи технологічні зав'язки;
- на згинальному верстаті котушці-човнику надають форму, відповідну кроку котушки по пазах і типу обмотки (рис. 2.6);

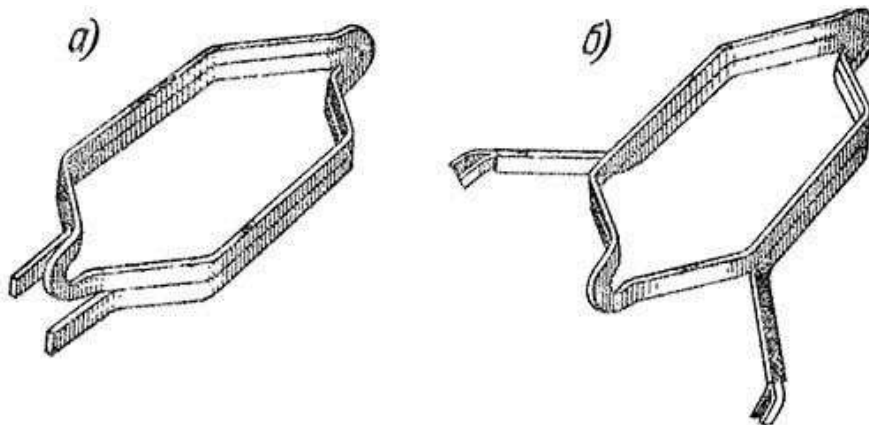


Рис. 2.6. а) петльова обмотка; б) хвильова обмотка.

- котушки вкладають вручну у пази якоря; причому в машинах змінного струму більшу сторону провідника розташовують паралельно дну паза (рис. 2.7) з метою зниження додаткових втрат, а в машинах постійного струму можливе розташування більшої сторони провідника паралельно стінці паза (рис. 2.8);

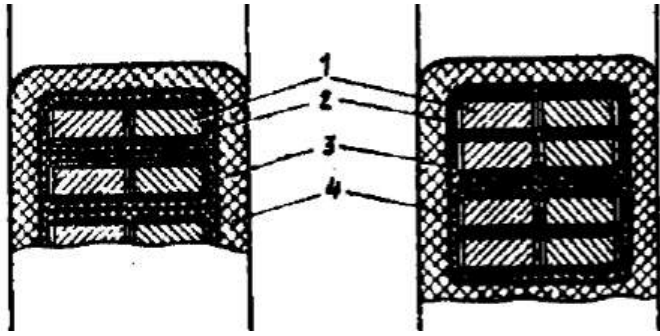


Рис. 2.7. а) фрагмент котушки с двома паралельними провідниками у витку; б) те ж с чотирма паралельними провідниками в витку.

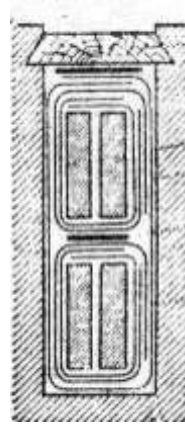


Рис. 2.8.

- застосувавши безперервну або пазову ізоляцію, обмотку закріплюють у пазу за допомогою клинів (рис. 2.8, рис. 2.9 і рис. 2.10).

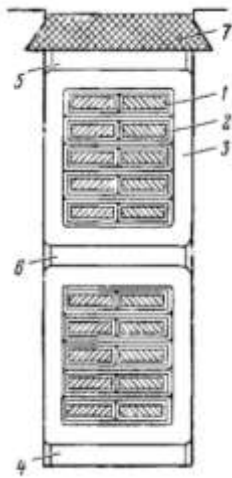


Рис. 2.9.

1-провідник; 2-виткова ізоляція; 3-неперервна ізоляція; 4,5,6-ізоляційні прокладки; 7-клин.

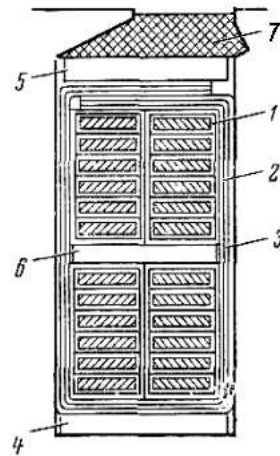


Рис. 2.10.

1-провідник; 2-ізоляція котушки; 3-пазова(гільзова) ізоляція; 4,5,6-ізоляційні прокладки; 7-клин

На рис. 2.9 показаний у розрізі паз з безперервною ізоляцією, тобто кожна котушка має власну пазову (корпусні) ізоляцію.

Паз з гільзовою ізоляцією наведено на рис. 2.10; тут пазова (корпусна) ізоляція загальна.

З метою зменшення відкриття пазу (шліца), що впливає на коефіцієнт Картера, котушку жорсткої обмотки поділяють на дві частини і укладають в напіввідкриті пази. Таку обмотку називають напівжорсткої або підрозділеною. Зменшення шліца (відкриття) паза дозволяє знизити величину коефіцієнта Картера (рис. 2.10); при цьому повинна здійснюватися певна послідовність котушок при укладанні (рис. 2.11).

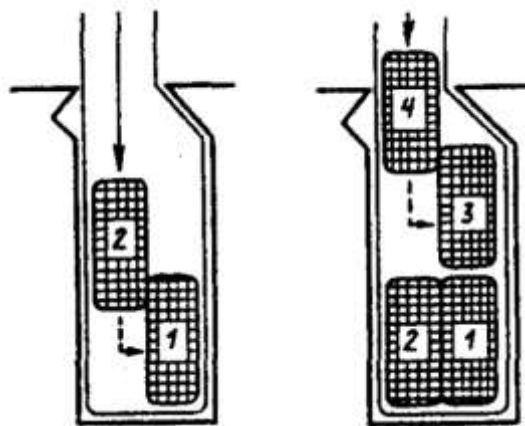


Рис. 2.11.

Напівжорстку обмотку виконують у випадку, якщо номінальна напруга не більше 660 В, а до її ізоляції немає спеціальних вимог. При напругах вище 660 В застосовують жорсткі обмотки з відкритими прямокутними пазами.

Особливо слід відзначити, що розташування провідників в пазу «плазом» (тобто більшою стороною паралельно дну пазу) сприяє зменшенню впливу ефекту витіснення, тобто більш рівномірному розподілу струмів по висоті провідника та зменшення втрат в ньому. Цьому сприяє і вимога виконувати провідники з перерізом не більше $17...20 \text{ мм}^2$, тому при необхідному ефективному перерізі витка більше 20 мм^2 його виконують з декількох провідників у паралель, переріз яких не перевищує $17...20 \text{ мм}^2$. Такі провідники і їх переріз називають елементарними.

Рівномірність розподілу струмів між паралельними провідниками досягають зміною їх місця розташування по висоті пазу у другій стороні котушки (секції) вигином в голівці лобових частин, що є спрощеною транспозицією.

Можливість розміщення обмотки в попередньо розрахованих розмірах пазу перевіряється складанням специфікацій, ізоляційна частина яких та рекомендації наведені у [1; 2; 3].

До переваг жорстких обмоток відносять:

- можливість виготовлення машин постійного струму понад 30 кВт, а машин змінного струму понад 100 кВт;
- застосування для машин з номінальною напругою понад 660 В;
- висока механічна міцність лобових частин у порівнянні з всипною обмоткою;
- лобові частини мають вигляд плетеного кошика (корзиночний вид), що сприяє кращому їх охолодженню.

Недоліками жорстких обмоток вважають:

- більш складна технологія виготовлення порівняно з всипною обмоткою;
- підвищені трудовитрати через неможливість застосування автоматизації та механізації при укладанні обмотки;
- підвищена величина шліців (відкриття пазів), що обумовлює збільшення коефіцієнта Картера і зростання МРС повітряного проміжку;
- зростання амплітуд магнітних полів вищих гармонік зубцевих порядків, що зумовлює зростання додаткових втрат у сталі і погіршення віброакустичних властивостей машини.

2.2.3. Стрижневі обмотки

Цей конструктивний тип обмоток якоря (статора) виконують з прямокутних провідників в електричних машинах великої потужності, у яких значні величини фазних струмів, що вимагають великого ефективного перерізу витка. До таких машин відносять турбогенератори і гідрогенератори, а також синхронні та асинхронні двигуни великих потужностей.

Особливістю стержневої обмотки статора, яку виконують як двошарову, є те, що число витків в котушці (або секції) дорівнює одиниці, $w_k = 1$, а значить число провідників у пазу $U_n = 2$. Це дозволяє виконувати обмотку з окремих стержнів, які виглядають половиною витка. Вид піввитка визначає тип обмотки - хвильова або петльова (рис. 2.12).

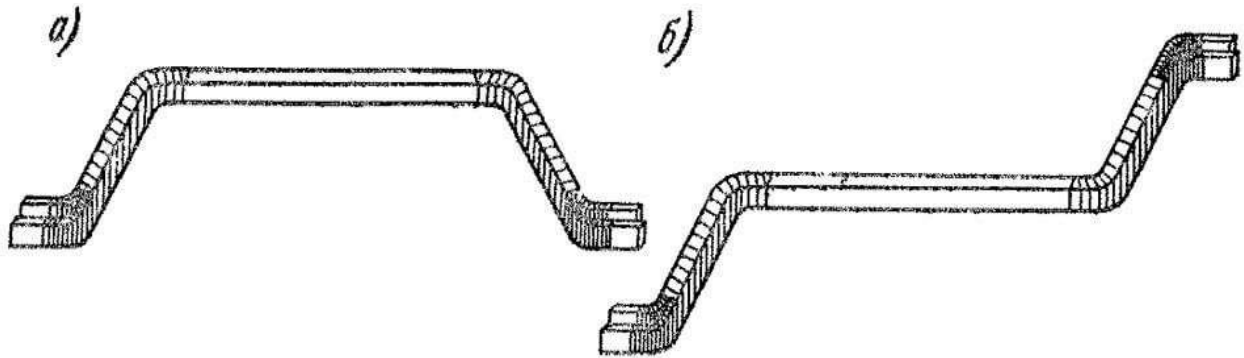


Рис. 2.12. а) петльова обмотка; б) хвильова обмотка

Стержень виконують з елементарних провідників з перерізом не більше $17...20 \text{ мм}^2$, сумарний переріз яких відповідає необхідному ефективному перерізу витка, а для зменшення нерівномірності розподілу струмів по елементарним провідникам уздовж стрижня здійснюють перекладку провідників (транспозицію). Така перекладка подібна неперервній транспозиції у двоходових гвинтових обмотках трансформаторів і вимагає запасу в пазу розміру висоти одного елементарного провідника (рис. 2.13).

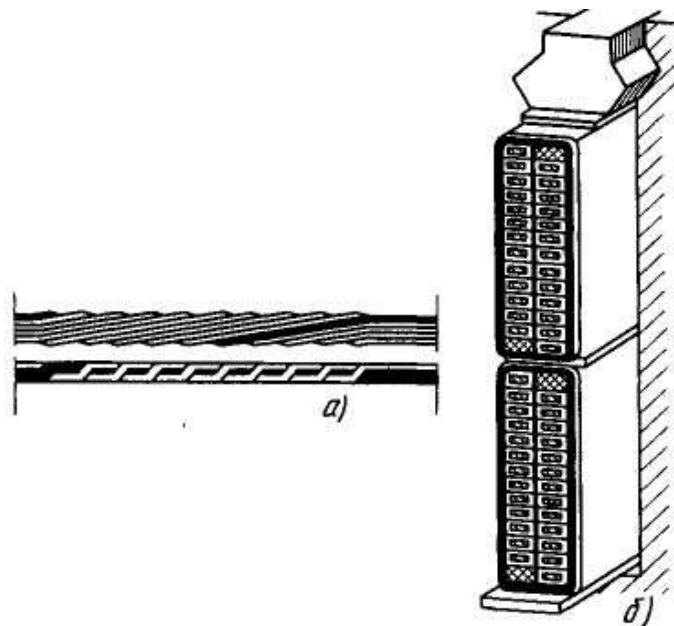


Рис. 2.13.

Така транспозиція забезпечує всі можливі положення провідника по висоті і ширині паза, тобто однакові довжину та умови в магнітному полі розсіювання.

Стрижні мають безперервну ізоляцію, їх укладають у пази статора, а потім здійснюють пайку стрижнів між собою відповідно до схеми обмотки (рис. 2.14).

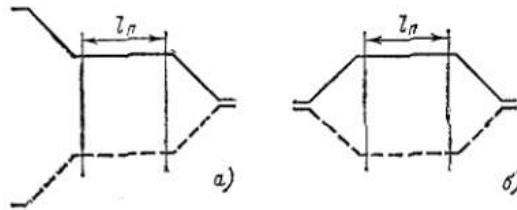


Рис. 2.14. а) хвильова обмотка; б) петльова обмотка.

Перевагою стрижневих обмоток статорів є:

- можливість виконання електричних машин великих потужностей;
- забезпечення електричної міцності до напруг 25 кВ;
- достатня механічна міцність лобових частин при застосуванні кріплення до кронштейнів;
- гарне охолодження лобових частин, що мають «кошиковий» вигляд.

Істотними недоліками стрижневих обмоток вважають:

- складна технологія виготовлення стрижнів;
- порівняно велика вартість виготовлення через неможливість застосування автоматизації та механізації.

Слід зазначити, що стрижневі обмотки застосовують для обмоток збудження потужних турбогенераторів з безпосереднім охолодженням (рис. 2.15). На рис. 2.15а наведено переріз пазу обмотки збудження з аксіальною вентиляцією, а на рис. 2.15б - з радіальною.

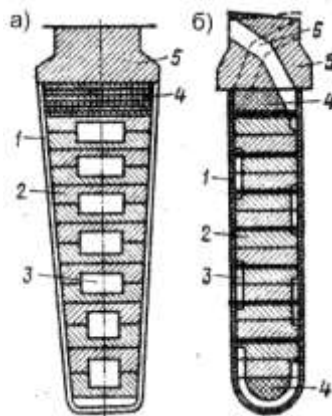


Рис. 2.15. 1-пазова ізоляція; 2-провідник; 3-охолоджуючий канал; 4-ізоляційні прокладки; 5-клин; 6-вхід охолоджуючого каналу

Стрижневі обмотки застосовують в роторах асинхронних двигунів з фазним ротором великої потужності. Такі обмотки виготовляють з ізольованої шинної міді або алюмінію. Стрижень має необхідний вигин лобової частини з одного боку (рис. 2.16а), а прямолінійну частину стрижня з іншого боку просувають в паз, який виконують напівзакритим (рис. 2.16б). Такий паз забезпечує достатню механічну міцність при дії відцентрових сил. Це відноситься і до лобових частини, які після розташування стрижнів в пазах згинають з прямолінійної сторони в потрібному напрямку, а потім паяють місця стиків лобових частин стрижнів.

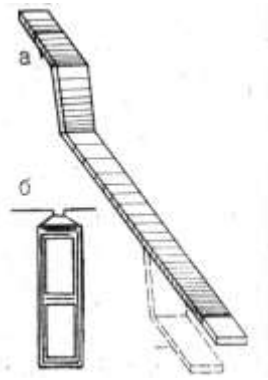


Рис. 2.16. а – стрижень; б – розміщення в пазу.

Стрижневі обмотки фазного ротору дозволяють забезпечити високий коефіцієнт заповнення паза міддю, тому що виток виконують однією суцільною шиною. Крім того, при пуску за рахунок ефекту витиснення підвищується пусковий момент, а при номінальному ковзанні ефект витиснення практично відсутній через малі частоти струмів ротора.

2.3. Короткозамкнені обмотки

Короткозамкнені обмотки знаходять широке застосування в електричних машинах, що вимагає знайомство з їх конструктивним виконанням, хоча вони не є якірними (основними).

В асинхронних двигунах короткозамкнені обмотки беруть участь в перетворенні енергії, а пускові і заспокійливі короткозамкнені обмотки на полюсах синхронних машин дозволяють забезпечити відповідно запуск і усунути (або послабити) коливання ротора синхронних машин.

Короткозамкнені обмотки роторів асинхронних машин за способом виготовлення поділяють на литі і зварні.

Литі короткозамкнені обмотки виконують в асинхронних двигунах потужністю до 70 кВт; при цьому одночасно відливають вентиляційні лопатки, що сприяють поліпшенню охолодження лобових частин обмотки (рис. 2.17). Обмотку виконують, звичайно, з алюмінію, який заливають в грушоподібні пази (рис. 2.18а), а при необхідності підвищення пускового моменту литу обмотку виконують з пазами вузькими і прямокутними (рис. 2.18б) для підвищення впливу ефекту витиснення.

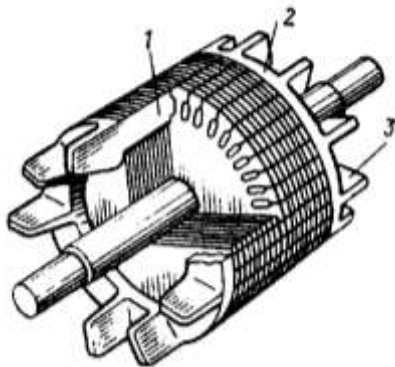


Рис. 2.17.

1-стержні; 2-к.з. кільця; 3-лопатки.

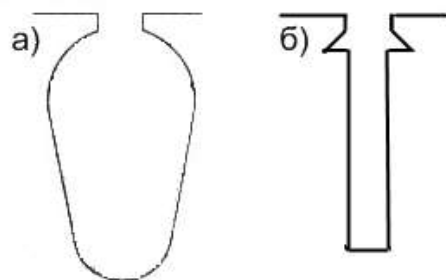


Рис. 2.18.

а) паз овальний; б) паз прямокутний

На рис. 2.19 наведено ротор з короткозамкненою обмоткою в прямокутних пазах. Такі ротори називають глибокопазні.

При потужностях понад 100 кВт для отримання необхідного пускового моменту (особливо при малополюсній машині) литу короткозамкнену обмотку виконують з фігурними пазами (по суті двоклітковими, рис. 2.20).

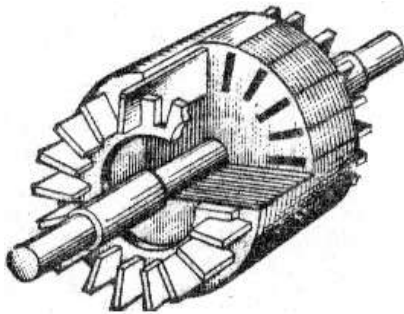


Рис. 2.19.

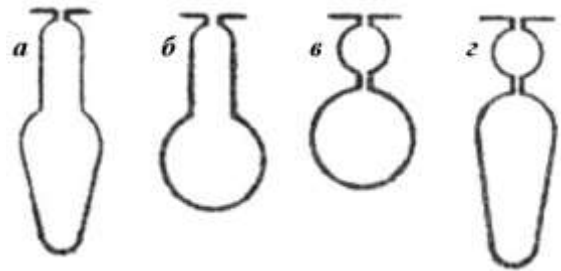


Рис. 2.20.

а) лопатковий паз; б) колбоподібний паз; в,г) двоклітковий паз

При заливанні пазів алюмінієм одночасно відливаються короткозамкнені кільця, які крім функції лобових частин утримують пакет сталі ротора від розсихтовки (рис. 2.21)

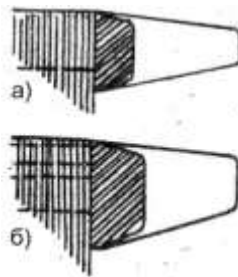


Рис. 2.21. а- однокліткова обмотка; б- двокліткова обмотка.

Зварні клітки (рис. 2.22) застосовують у спеціальних та великої потужності асинхронних двигунах.

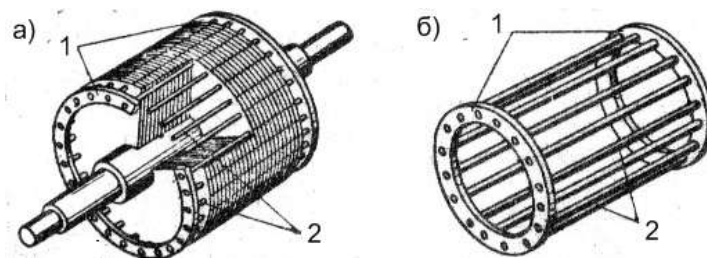


Рис. 2.22. 1-к.з. кільця; 2-стержні.

Стержні обмотки розташовують у пазах різної конфігурації (рис. 2.23а,б,в), а короткозамкнені кільця відокремлені від торців пакету магнітопроводу ротора (рис. 2.24).

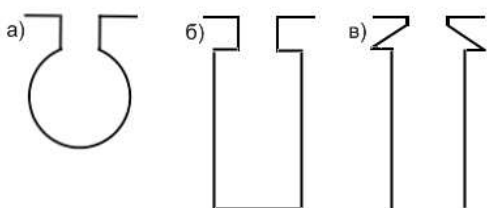


Рис. 2.23.



Рис. 2.24.

Для механізмів з великими пусковими моментами застосовують зварні двокліткові короткозамкнені обмотки, які являють собою дві самостійні короткозамкнені обмотки. Стрижні розташовують в пазах, що мають форму, як на рис. 2.20в,г. Верхній стрижень (тобто верхня короткозамкнута обмотка) виконують з латуні, що має більший питомий опір і більш високу теплоємність, ніж мідь. Ця обмотка виконує роль пускової. Нижня обмотка є робочою і її виконують з міді. Верхні і нижні стрижні мають окремі короткозамикаючі кільця (рис. 2.25). Загальний вид двокліткового ротора наведено на рис. 2.26.

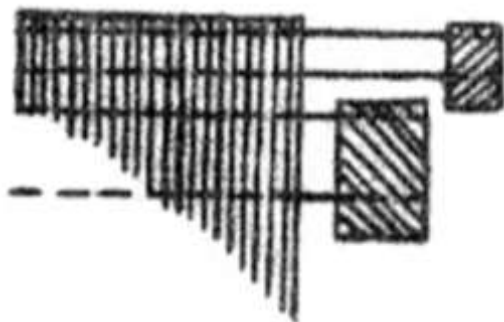


Рис. 2.25.

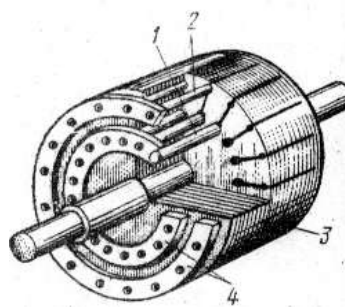


Рис. 2.26.

1-стержень робочої обмотки; 2-стержень пускової обмотки; 3-сталь ротора; 4-к.з. кільця.

Зварні короткозамкнені обмотки використовують в явнополюсних машинах як демпферні (заспокійливі) у генераторів, так і пускові в двигунах.

Загальний вигляд таких обмоток зображений на рис. 2.27. Пускові обмотки виконуються в синхронних двигунах більш потужними, ніж у генераторів. Демпферні обмотки генераторів виконують з міді, а пускові, які одночасно виконують роль демпферів, виготовляють з латуні для поліпшення пускових властивостей. Короткозамкнені кільця можуть бути повно замкнуті (рис. 2.27) або частково замкнуті, тобто замикають стрижні тільки полюсних наконечників, а між полюсами не з'єднані. В обох випадках кільця відносять від країв полюсних наконечників.

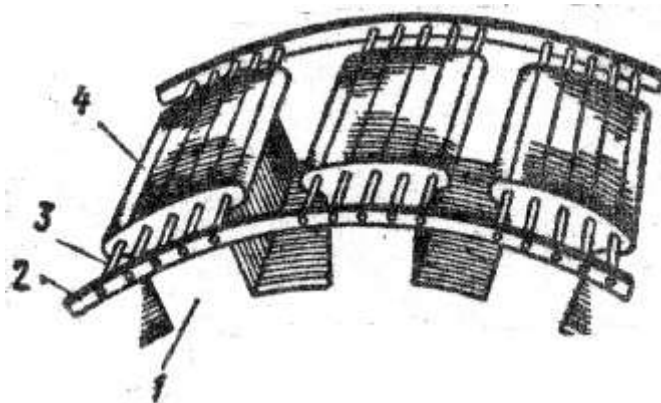


Рис. 2.27. 1-полюс; 2-к.з. кільце; 3-стержні; 4-полюсний наконечник

2.4. Висновки та рекомендації

З розглянутих конструктивних форм розташування провідників обмоток як-рив в пазах впливає, що обмотки можуть виконуватися з круглого і прямокутного проводу. Обмотки з круглого проводу виготовляють в машинах постійного струму

потужністю до 30 кВт, а в машинах змінного струму - до 100 кВт. При цьому такі обмотки називають «всипними», їх провідники «всипають» в пази трапецеїдальної або грушоподібної (овальної) форми.

При потужностях понад 30 кВт для машин постійного струму і 100 кВт для машин змінного струму використовують для обмоток прямокутні проводи, які утворюють витки і укладають у відкриті (напіввідкриті) пази.

Таким чином, приступаючи до проектування якірних обмоток, за відомої потужності машини слід визначитися, чи іншими словами, прийняти наперед конструктивний тип обмотки і форму паза. Така рекомендація відноситься і до інших обмотках, що застосовують у проєктованій машині.

2.5. Розрахунок електрорушійних сил якірних обмоток при проектуванні

Величина ЕРС якірної обмотки впливає на величину розрахункової (електромагнітної) потужності електричної машини, що впливає з загального виразу

$$S_{\Sigma M} = mE_1 I_1. \quad (2.4)$$

У машинах постійного струму розрахунок ЕРС якоря

$$E_a = \frac{pN}{a} \Phi \cdot n = \pi \sqrt{2} f_a W_a \Phi_a K_{об}, \quad (2.5)$$

вимагає врахування меншого числа факторів в порівнянні з розрахунком ЕРС обмоток якоря (статора) машин змінного струму. Це обумовлено тим, що в машинах постійного струму магнітне поле постійно направлене і нерухоме в просторі, а відносно нього переміщуються провідники обмотки якоря. Обмотувальний коефіцієнт є сталою величиною – 1,11.

Як відомо [3], перетворення енергії в машинах змінного струму здійснюється за рахунок перших гармонік МРС і магнітного потоку. У той же час в їх сумарних кривих містяться й гармоніки вищих порядків, $\nu > 1$. Основна (тобто перша $\nu = 1$) та вищі гармоніки магнітного поля у повітряному проміжку створюють в обмотках якоря ЕРС відповідної частоти.

Наявність в обмотці якоря цілого спектра вищих гармонік ЕРС не бажана, тому що:

- спотворює форму вихідної напруги в синхронних генераторах;
- сприяє появі додаткових втрат і моментів;
- погіршують віброакустичні характеристики машини;
- несприятливо позначаються на роботі живлячих мереж та обладнання в них.

Як правило, вищі гармоніки непарні, а їх часткове зменшення здійснюють за допомогою конструктивних заходів для отримання синусоїдального розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку. Наприклад, збільшення повітряного проміжку під краями полюсного наконечника у явнополюсних синхронних машинах.

Разом з тим, на стадії проектування зменшення небажаних вищих гармонік ЕРС в обмотках якоря здійснюють за допомогою обмотувальних коефіцієнтів: скосу, укорочення і розподілу.

Механізм зменшення вищих гармонік ЕРС простіше почати з аналізу ЕРС в елементі обмотки - провіднику, довжина якого відповідає розрахунковій - l_δ .

Відповідно до закону електромагнітної індукції у трактуванні Фарадея миттєве значення ЕРС провідника

$$e_{np} = B_x l \dot{\vartheta}. \quad (2.6)$$

Для синусоїдального розподілу індукції в повітряному проміжку з амплітудним значенням B_δ діючі значення ЕРС провідника

$$E_{np} = \frac{E_{m,np}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f B_\delta l_\delta \tau, \quad (2.7)$$

де $E_{m,np} = B_\delta l_\delta \dot{\vartheta} = 2 f B_\delta l_\delta \tau$ - амплітуда ЕРС в провіднику від першої гармоніки;

$\nu = \pi D n = 2 p \tau \frac{f}{p} = 2 \tau \cdot f$ - частота обертання.

Як впливає з [1, 3] в провіднику наводяться ЕРС зубцевого порядку

$$\nu_z = \frac{z}{p} k \pm 1, \quad (2.8)$$

де $k = 1, 2, 3 \dots$

Для їх придушення застосовують скіс пазів, тобто паз виконують із зсувом щодо осі валу на величину $b_{ск}$ по колу (рис. 2.28). При цьому ЕРС на елементарних ділянках провідника обмотки (рис. 2.28б) складаються не арифметично, а по дузі (рис. 2.29), причому результуючої є хорда ΔE .

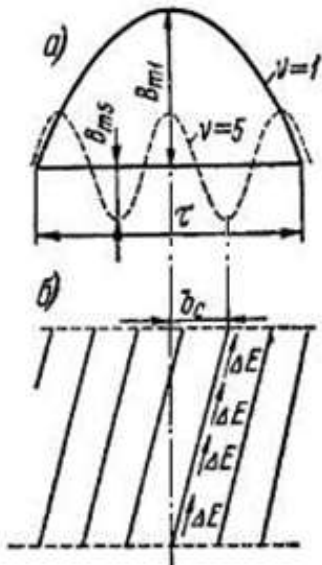


Рис. 2.28. – Зсув пазів

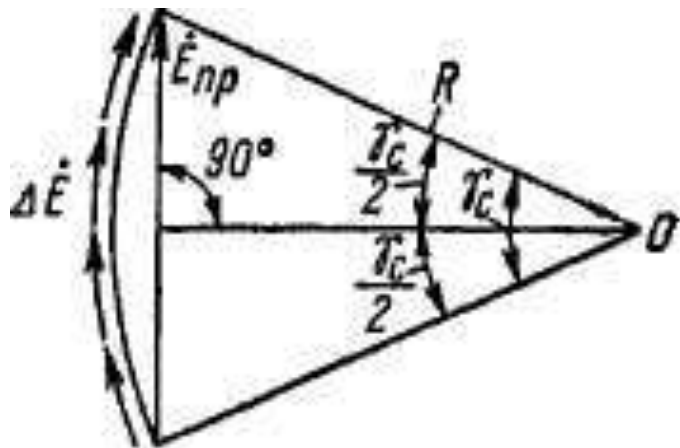


Рис. 2.29. – Складання ЕРС провідників

Таким чином, при зазначеному на рис. 2.28а розподілі магнітної індукції для першої ($\nu = 1$) і п'ятої ($\nu = 5$) гармонік на полюсному поділу та при скосі провідника на зубцеву крок ЕРС для п'ятої гармоніки в провіднику компенсується ($\sum \Delta E_5 = 0$, рис. 2.28б), а перша гармоніка (згідно рис. 2.28) зменшиться в загальному випадку на коефіцієнт скосу

$$K_{ck} = \frac{2R \cdot \sin \frac{\gamma_{ck}}{2}}{R\gamma_c} = \frac{\sin(\frac{\theta_{ck}}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2})}{\frac{\theta_{ck}}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \leq 1, \quad (2.9)$$

де $\gamma_c = \theta_{ck} \cdot \frac{\pi}{\tau}$ - кут скосу; для ν -тої гармоніки $\gamma_{c\nu} = \gamma_c \nu$

З урахуванням (2.7) і (2.9) ЕРС провідника від першої гармоніки магнітного поля

$$E_{np} = \sqrt{2} f B_{\phi} l_{\phi} \tau \cdot K_{ck}, \quad (2.10)$$

причому при відсутності скосу $K_{ck} = 1$.

Слід зазначити, що скіс пазів якоря (статора) або скіс полюсів в явнополюсних синхронних машинах здійснюють в машинах малої потужності, де виконати обмотку із збільшеним числом пазів на полюс і фазу q - важко.

Скіс виражають у вигляді відношення θ_{ck}/t (t - зубцевий крок) і приймають (0.8...1). При цьому величина K_{ck} для $\nu=1$ близька до одиниці, а для гармонік порядку зубчастості істотно зменшується.

Два провідника за допомогою лобових частин з'єднують і утворюють виток. Відстань між двома провідниками витка (крок) виконують діаметральним ($y = \tau$) або скороченим. Скорочений крок дозволяє також послабити величини вищих гармонік ЕРС у витку. На рис. 2.30 показаний виток з скороченим кроком $y = \beta\tau$, в якому ЕРС п'ятої гармоніки в провідниках спрямована зустрічно, тобто скомпенсована. Однак, ЕРС першої гармоніки витка зменшується за рахунок тимчасового зсуву між векторами ЕРС провідників (рис. 2.30).

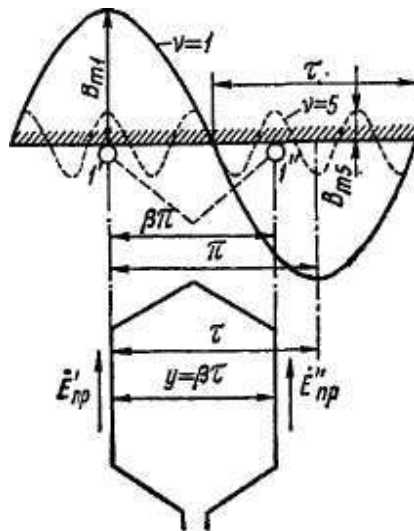


Рис. 2.30. – Визначення ЕРС першої гармоніки

Величину зменшення ЕРС першої гармоніки визначає коефіцієнт укорочення (рис. 2.31)

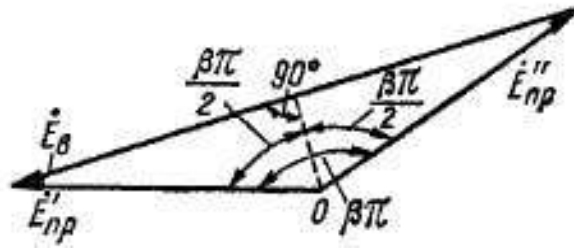


Рис. 2.31. – Зменшення ЕРС першої гармоніки

$$K_{ук} = \sin \frac{\beta\pi}{2}, \quad (2.11)$$

де $\beta = y/\tau$ - відносне укорочення для ν -тої гармоніки;

$$K_{ук\nu} = \sin \frac{\nu\beta\pi}{2}, \quad (2.12)$$

Укорочення кроку витка виконують в двошарових обмотках, і воно лежить в межах $\beta = 0,79 \dots 0,83$ з метою придушення п'ятої та сьомої гармонік. Це видно із залежності $K_{ук} = f(\beta)$ на рис. 2.32.

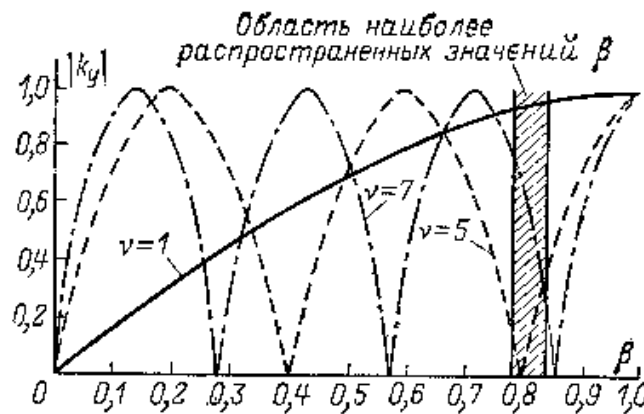


Рис. 2.32.

Особливо слід відзначити, що укорочення $\beta = 0,5\tau$ застосовують в двополюсних потужних машинах з жорсткими котушками для зручності виконання обмотки.

Витки утворюють котушки з W_k витками, тоді дійсне значення ЕРС котушки з урахуванням (2.10) приймає вигляд

$$E_k = 2\sqrt{2} f \cdot W_k K_{ук} K_{ск} B_{\delta} l_{\delta} \tau, \quad (2.13)$$

або

$$E_k = \pi\sqrt{2} f \cdot W_k K_{ук} K_{ск} \Phi, \quad (2.14)$$

де $\Phi = B_{cp} l_{\delta} \tau = \frac{2}{\pi} B_{\delta} l_{\delta} \tau$ - максимальне значення магнітного потоку одного полюса.

Необхідну кількість послідовних витків в фазі (або паралельної вітці) забезпечують послідовним з'єднанням q котушок у котушкові групи. При цьому всі котушки можна зосередити в одному пазу (рис. 2.33а) або розосередити по $2q$ пазах

(рис. 2.33б).

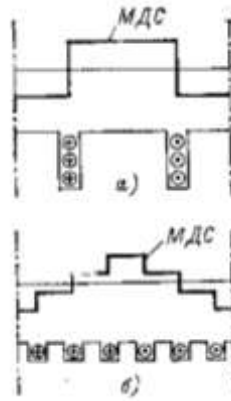


Рис. 2.33. – Розподіл котушок по пазах

При зосередженій обмотці в одному пазу сумарна ЕРС q котушок дорівнює алгебраїчній сумі всіх q котушок. Розосереджені q котушки по $2q$ пазах створюють сумарну ЕРС як геометричну суму, яка менша ніж при зосередженні. Однак, розподілена обмотка має ряд істотних переваг:

- крива МРС має ступеневий вигляд (рис. 2.33б), що дозволяє зменшити спектр вищих гармонік;
- зменшити амплітуди ЕРС вищих гармонік;
- поліпшити охолодження обмотки.

Просторовий розподіл котушок по $2q$ пазах призводить до тимчасового зсуву векторів ЕРС котушок на кут $\alpha_z = 2\pi \cdot p / z$ для першої гармоніки ЕРС, а для ν -тої - $\alpha_\nu = 2\pi \cdot p \nu / z$.

Зменшення сумарної ЕРС першої гармоніки котушкової групи враховують за допомогою коефіцієнта розподілу, який згідно з рис. 2.34 для $q=3$ визначено для першої гармоніки ЕРС як

$$K_p = \frac{E_{\kappa,r}}{qE_\kappa} = \frac{2R \cdot \sin \frac{q\alpha_z}{2}}{2R \cdot q \cdot \sin \frac{\alpha_z}{2}} = \sin \frac{q \cdot \alpha_z}{q \cdot \sin \frac{\alpha_z}{2}}, \quad (2.15)$$

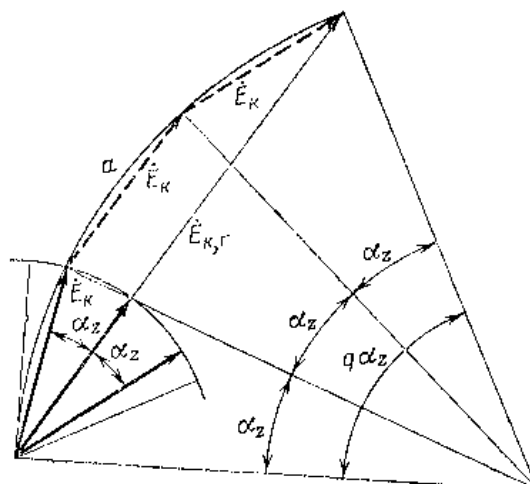


Рис. 2.34. – Зменшення ЕРС першої гармоніки

а для m -фазної машини

$$K_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2mq}}. \quad (2.16)$$

Для ν -тої гармоніки магнітного поля

$$K_{p\nu} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m} \cdot \nu)}{q \cdot \sin(\frac{\pi}{2mq} \cdot \nu)}, \quad (2.17)$$

Як показують розрахунки для 3-х фазних машин коефіцієнт розподілу першої гармоніки лежить в межах $K_p = 0,966 \dots 0,955$ при $q = 2 \dots \infty$. При цьому $K_{p\nu}$ може залишатися таким же як і для першої гармоніки, або зменшуватися. Це залежить від числа q . Наприклад, при $q_1 = 3$ для першої гармоніки $K_p = 0,96$, а для п'ятої гармоніки - $K_{p5} = 0,217$. Графічне зображення для цього прикладу показано на рис. 2.35.

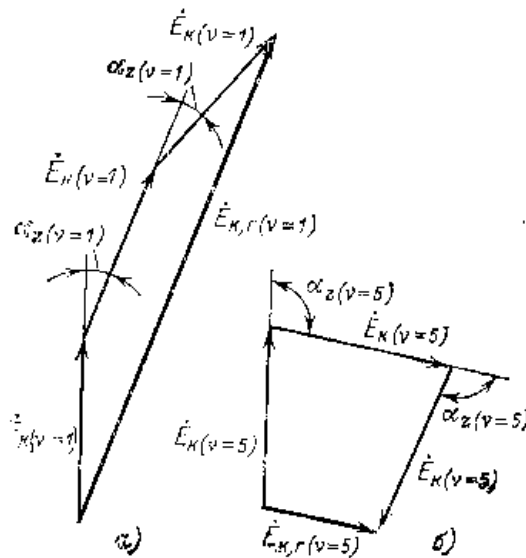


Рис. 2.35. – Вплив q на K_p

Таким чином, сумарне діюче значення ЕРС розподілених q котушок (або котушкової групи) для першої гармоніки

$$E_q = \pi \sqrt{2} f \cdot q \cdot W_K K_{yk} K_{ck} K_p. \quad (2.18)$$

Враховуючи, що котушкові групи в фазі з'єднуються, утворюючи W послідовних витків, то ЕРС якоря (статорної обмотки)

$$E_1 = \pi \sqrt{2} f_1 \cdot W_1 K_{ob1} \Phi_1, \quad (2.19)$$

де $K_{ob1} = K_{yk1} K_{ck1} K_{p1}$ - обмотувальний коефіцієнт.

З наведеного вище випливає, що для обмоток якоря машин змінного струму:

- застосування скосу пазів, укорочення кроку і розподіл обмоток сприяє поліпшенню експлуатаційних характеристик (зменшення впливу вищих гармонік,

зниження шумів і вібрації, підвищенню ККД, поліпшенню охолодження);

- обмотувальний коефіцієнт менше одиниці, що вимагає отримання потрібної E_1 і S_{EM} (2.1), збільшувати витрату активних і конструктивних матеріалів.

У висновку слід вказати спільне та відмінне між обмотками машин постійного і змінного струмів.

Спільним є те, що провідники обмоток розташовуються в пазах по всьому колу якоря. Ця особливість дозволяє застосувати загальний підхід до розрахунку кількості активних провідників у пазу без урахування особливостей з'єднання секцій (або катушок) між собою.

Відмінність полягає в тому, що в машинах постійного струму виконують обмотку короткозамкненою (через з'єднання у колекторних пластинах) або нерозрізною (рис. 2.36).

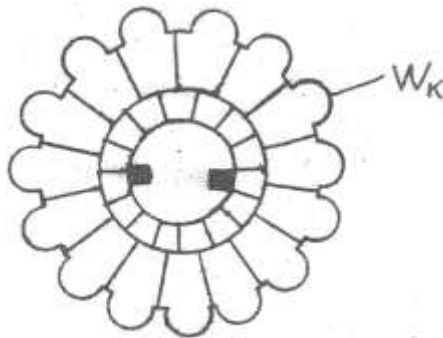


Рис. 2.36. – Нерозривна обмотка

В машинах змінного струму обмотку поділяють (розрізна) на 3 зони (тризонна, рис. 2.37) або 6 зон (шестизонна, рис. 2.38)

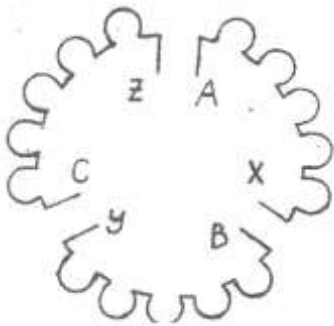


Рис. 2.37. Тризонна обмотка

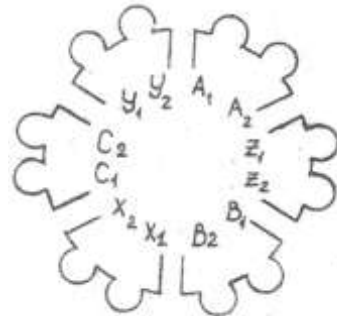


Рис. 2.38. Шестизонна обмотка

В машинах змінного струму застосовують 6-ти зонну обмотку, тому що обмотувальний коефіцієнт розподілу цієї обмотки більше. При $q \rightarrow \infty$ максимальний коефіцієнт розподілу становить для 3-х зонної обмотки $K_{p3} = 0,828$, а 6-ти зонної - $K_{p6} = 0,955$.

2.6. Коротка характеристика особливостей основних типів якірних обмоток електричної машини

В даному випадку під типом обмотки (як це прийнято в теорії електричних машин) слід розуміти особливості послідовного з'єднання лобових частин катушок

(секцій) між собою відповідно до схеми обмотки, а також по розташуванню кількості сторін котушок в одному і тому ж пазу.

За формою лобових частин для з'єднання котушок (або витків) між собою розрізняють:

- петльові (рис. 2.39)
- хвильові (рис. 2.40)
- жаб'ячі (рис. 2.41)

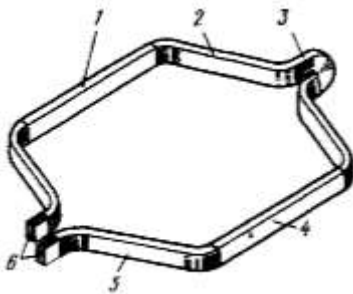


Рис. 2.39.

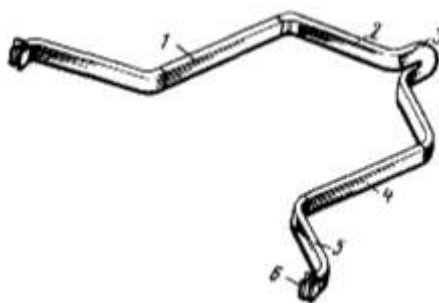


Рис. 2.40.

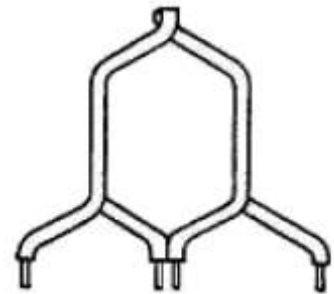


Рис. 2.41.

На рис. 2.39 і рис. 2.40 позначено: 1 і 4 - активні сторони котушки, 2 і 5 - лобові частини; 3 - головка; 6 - місця з'єднання з іншими котушками або з колекторними пластинами.

За кількістю сторін секцій в пазу розрізняють:

- **одношарові;**
- **двошарові.**

Вибір того чи іншого типу обмотки є складною проблемою, тому вимагає врахування величин потужності, струму, напруги, а також особливостей виготовлення, експлуатації, ремонту та інших факторів. У цьому зв'язку слід використовувати відповідні рекомендації, наведені у [1, 2, 3, 4] і засновані на багатому досвіді проектування електричних машин.

Разом з тим, можна виділити ряд основних особливостей застосовуваних обмоток електричних машин, які обов'язково необхідно знати і враховувати при їх проектуванні.

Враховуючи специфіку якірних обмоток машин постійного і змінного струму, нижче окремо розглядаються якірні обмотки для цих типів машин.

2.6.1. Якірні обмотки машин постійного струму

На практиці застосовуються такі типи обмоток якоря машин постійного струму:

- **проста хвильова;**
- **складна хвильова;**
- **проста петльова;**
- **складна петльова;**
- **жаб'яча;**

Одним з основних ознак, які обмежують застосування тієї чи іншої обмотки є:

- струм паралельної вітки (не більш 300А), що вимагає вибору відповідного числа паралельних віток ($2a$);

- величина напруги обмотки якоря, що вимагає відповідних величин магнітного потоку та кількості витків;
- величина напруги між сусідніми колекторними пластинами.

2.6.1.1. Хвильові обмотки

Схема вкладання та фрагмент розгорнутої схеми простої хвильової обмотки показані на рис. 2.42 і рис. 2.43.

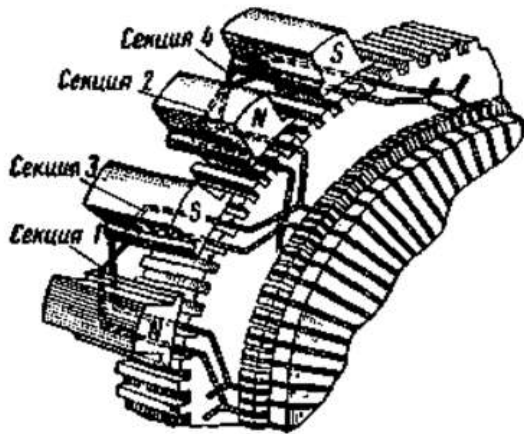


Рис. 2.42. - Схема укладки обмотки

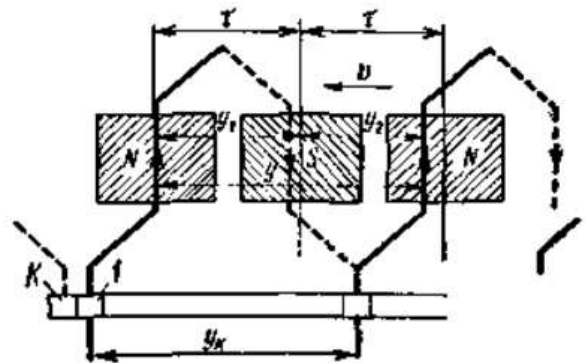


Рис. 2.43. - Розгортка обмотки

Особливостями простої хвильової обмотки є:

- крок обмотки по пазах $y = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon$, причому укорочення не дає економії міді

на лобових частинах;

- крок по колектору $y_k = \frac{K \pm 1}{p}$, де K - число колекторних пластин;

- число паралельних гілок $2a = 2$, що є важливою характеристикою обмотки.

Необхідність зменшення струму якоря в паралельній вітці до $i_a \leq 300\text{A}$, в машинах низьковольтних і великої потужності використовують складну хвильову обмотку, звичайно двоходову, тобто $m = 2$, або, рідше, трьохходову ($m = 3$). У цьому випадку число паралельних гілок $2a = 2m$.

Особливо слід відзначити, що хвильова обмотка вимагає такого вибору кількості пазів (або елементарних пазів), при якому не було «мертвих» секцій (рис. 2.44). Крім того, в складних хвильових обмотках необхідно передбачити виконання урівнюючих з'єднань другого роду (з'єднань точок рівного електричного потенціалу), щоб уникнути замикання цих струмів через щітки (рис. 2.45).

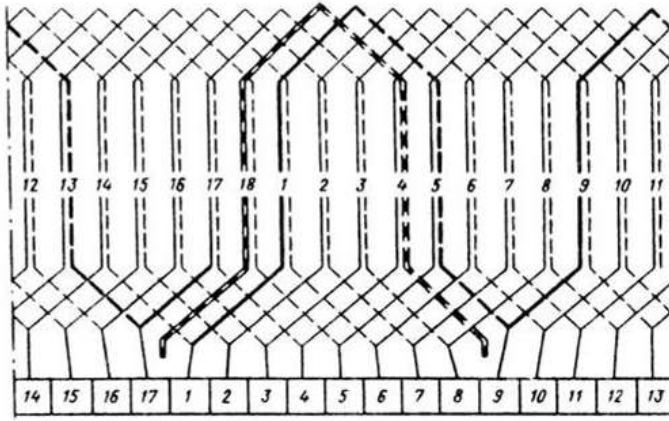


Рис. 2.44.

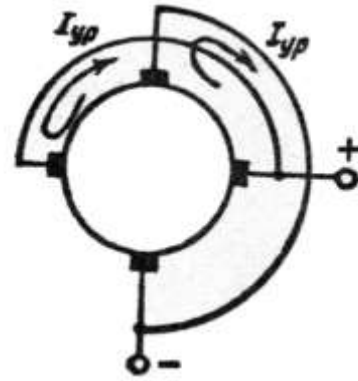


Рис. 2.45.

2.6.1.2. Петльові обмотки

Схеми укладання та фрагмент розгортки простої петльової обмотки показані на рис. 2.46 і рис. 2.47.

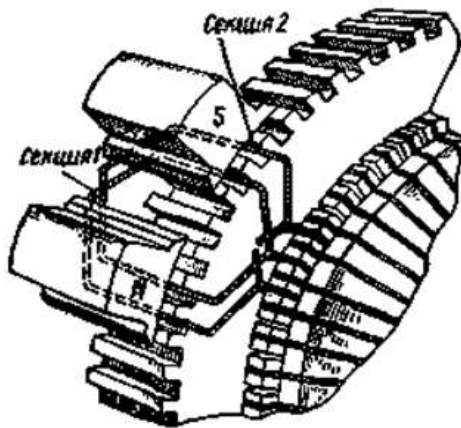


Рис. 2.46. - Схема укладки обмотки

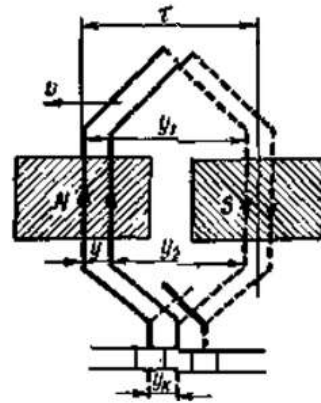


Рис. 2.47. - Розгортка обмотки

Проста петльова обмотка має:

- крок по пазах $y = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon$;
- крок по колектору $y_k = \pm 1$;
- число паралельних гілок $2a = 2p$.

Припустимо її застосовувати при якірній напрузі 220 В для номінальних потужностей до 100-500 кВт.

Складна петльова обмотка по суті являє дві ($m=2$) або три ($m=3$) самостійних обмотки з кроком по колектору $y = \pm m$, але має число паралельних гілок $2a = 2pm$. Застосовуються такі обмотки в машинах постійного струму великої потужності з низькою номінальною напругою або в спеціальних машинах з великим струмом якоря і номінальною напругою вище 110 В.

При $2p > 2$ в простих петльових обмотках необхідно застосовувати зрівняльні з'єднання першого роду (з'єднання точок теоретично рівного магнітного потенціалів), щоб розвантажити щітки від зрівняльних струмів (рис. 2.45). Зрівнювачі з'єд-

нують внутрішні точки лобових частин обмотки або з боку колектора (рис. 2.48 і рис. 2.49), або з протилежного колектору (рис. 2.49). Крок урівнюючих з'єднань

$$y_{ур} = \frac{K}{p}. \text{ Кількість урівнюючих з'єднань виконують (30-15)\% від можливого числа,}$$

а з повною кількістю виготовляють машини великих потужностей з важкими умовами пуску.

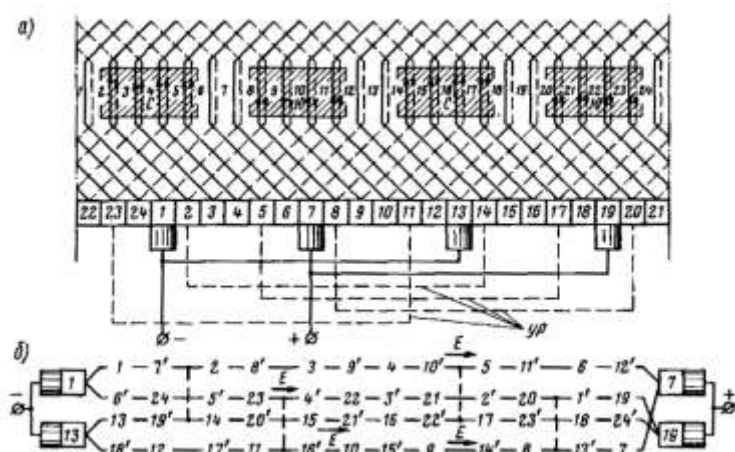


Рис. 2.48. - Зрівняльні з'єднання

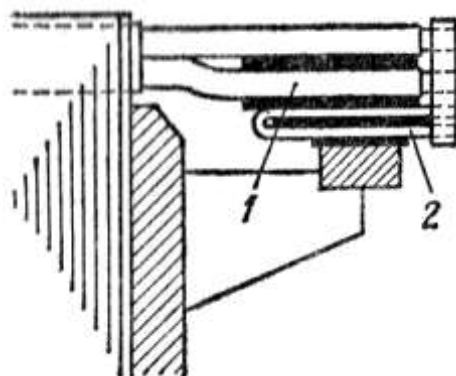


Рис. 2.49.

1 – лобова частина,
2 – урівнювач.

У складних петльових обмотках застосовують зрівнювачі (як і в складних хвильових) для зрівнювання навантаження на щітках, між різними ходами.

2.6.1.3. Жаб'ячі обмотки

Цей тип обмоток застосовується в машинах постійного струму спеціального призначення з важкими умовами комутації (наприклад, при ударних навантаженнях) і граничними потужностями: сама обмотка являє собою сукупність хвильової і петльової обмотки (рис. 2.41).

2.6.2. Якінні (статорні) обмотки машин змінного струму

Побудова і виконання обмоток змінного струму вимагає розрахунку і розподілу числа пазів на полюс і фазу - $q = z / (2pm)$. Ці пази заповнюють або повністю однією стороною котушки (одношарові обмотки), або двома сторонами різних котушок (двошарові обмотки).

2.6.2.1. Одношарові обмотки

Принцип розподілу пазів трифазної одношарової обмотки зображений на рис. 2.50 для випадку $2p = 4$, $Z = 24$ і $q = 2$. За формою котушок та технології виготовлення розрізняють такі типи одношарових обмоток:

- концентричні;
- шаблонні;
- ланцюгові.

На рис. 2.51 приведена розгорнута схема концентричної обмотки з розподілом пазів згідно рис. 2.50.

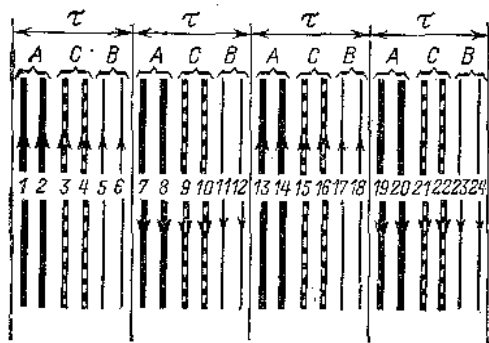


Рис. 2.50. - До побудови схем одношарових обмоток

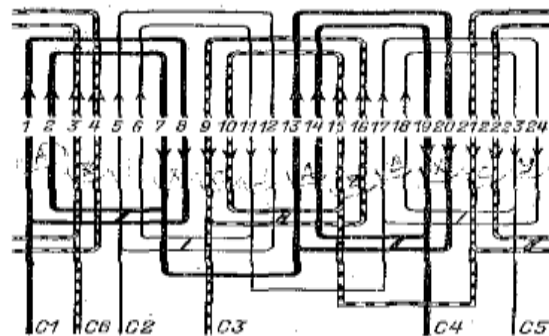


Рис. 2.51. - Схема одношарової концентричної обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$

Характерною особливістю цієї обмотки є концентричне охоплення катушок, тому розміри катушкових груп різні, що змушує робити відгин лобових частин груп катушок в різних площинах. Для обмотки на рис. 2.51 відгин лобових частин здійснюють у двох площинах (рис. 2.52).

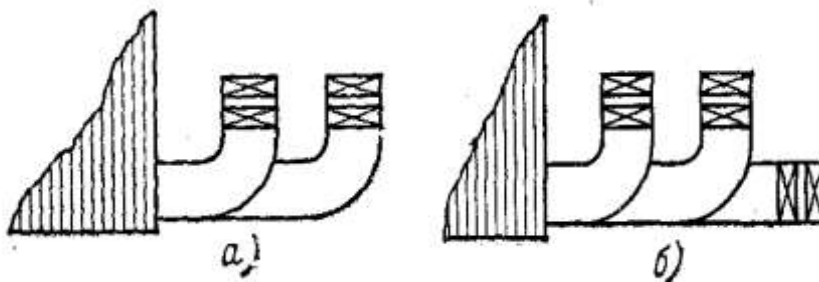


Рис. 2.52.

а) двохплощинне розташування лобових частин, б) трьохплощинне розташування лобових частин катушок

Необхідною умовою симетрії обмотки є рівна кількість великих і малих груп катушок у кожній фазі, що виконують при парному числі пар полюсів. У разі непарної кількості пар полюсів в одній з фаз змушені виконати одну катушку "кривою", рис. 2.53. Уникнути "крової" катушки можна виконанням трьохплощинної концентричної обмотки (рис. 2.54). Тут можливо домогтися симетрії по фазах шляхом різної довжини лобових частин з обох сторін якоря.

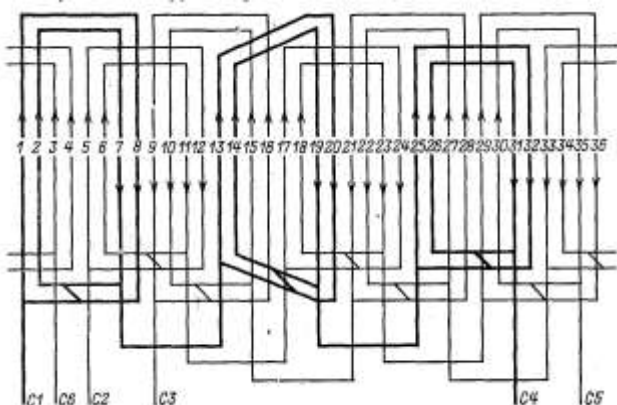


Рис. 2.53. – Схема одношарової концентричної обмотки з "кровою" катушкою, $Z = 36$, $2p = 6$

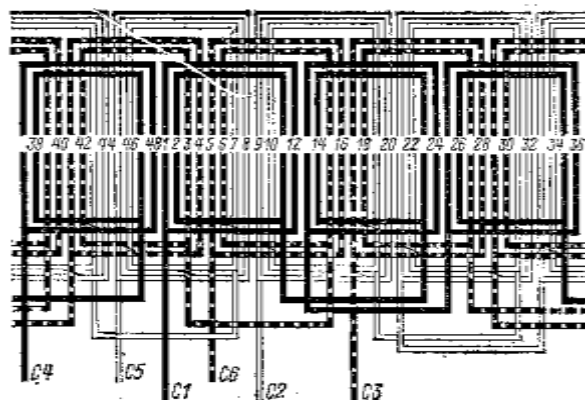


Рис. 2.54. – Схема трьохплощинної одношарової концентричної обмотки, $Z = 48$, $2p = 4$

Для розподілених вище пазів на полюс і фазу (рис. 2.50) на рис. 2.55 приведена шаблонна одношарова обмотка, що отримала таку назву через виготовлення катушок на шаблонах, кількість розмірів яких менше ніж у концентричних.

На рис. 2.56 приведена ланцюгова одношарова обмотка при тих же умовах, що і дві попередні. У цій обмотці застосовується шаблон одного розміру.

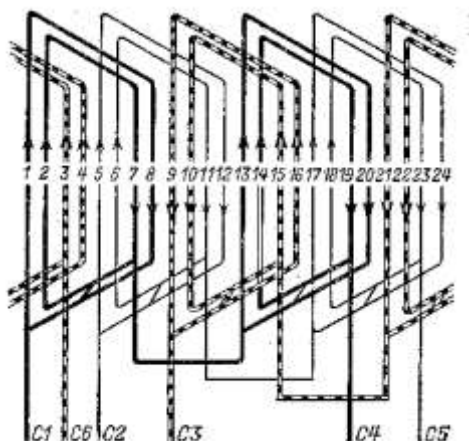


Рис. 2.55. - Схема шаблонної обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$.

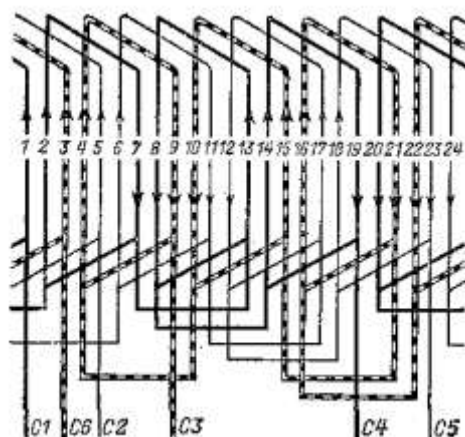


Рис. 2.56. - Схема ланцюгової обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$.

При $q = 4$ ці обмотки можуть виготовлятися "у розвалку" з метою економії витрат обмотувальної міді.

Наведені типи одношарових обмоток застосовуються в машинах потужністю до 15кВт і мають наступні переваги:

- можливість автоматичної або механічної укладки, бо в основному виготовляють з круглого проводу;
- виготовляються з меншими витратами праці, що підвищує ефективність обмотувальних робіт та виготовлення електричних машин в цілому;
- високий коефіцієнт заповнення паза міддю провідників;
- порівняно невеликий коефіцієнт Картера (коефіцієнт повітряного проміжку).

До недоліків одношарових обмоток слід віднести:

- незалежно від кроку по пазах окремих катушок коефіцієнт укорочення дорівнює одиниці, $K_{ук} = 1$;

- лобові частини таких обмоток не мають каналів (проміжків) між котушками, що погіршує охолодження обмоток якоря.

2.6.2.2. Двошарова обмотка

Двошарові обмотки застосовують в електричних машинах змінного струму потужністю від 15кВт і вище. При потужності менше 100кВт такі обмотки виконуються з круглого проводу, при великих потужностях - з прямокутного проводу.

Як і для одношарових обмоток у двошарових обмотках виділяють число пазів на полюс і фазу, а верхні сторони розташовують згідно числа q і послідовності AZBXCУ на кожній парі полюсів. Верхні сторони котушки (суцільні лінії) з'єднуються з нижніми (штриховими лініями) згідно величини кроку по пазах. Котушкові групи однієї і тієї ж фази лежать під різнойменними полюсами (або фазними зонами) і з'єднуються зустрічно, щоб ЕРС обох котушкових груп складалися.

Для розподілу пазів по фазах на рис. 2.50 побудована розгорнута схема двошарової обмотки для фази А з діаметральним кроком ($y = \tau$) на рис. 2.57 Аналогічно здійснюють побудову для фаз В і С. При цьому слід зауважити, що кількість котушкових груп двошарової обмотки в 2 рази більше ніж у одношарової.

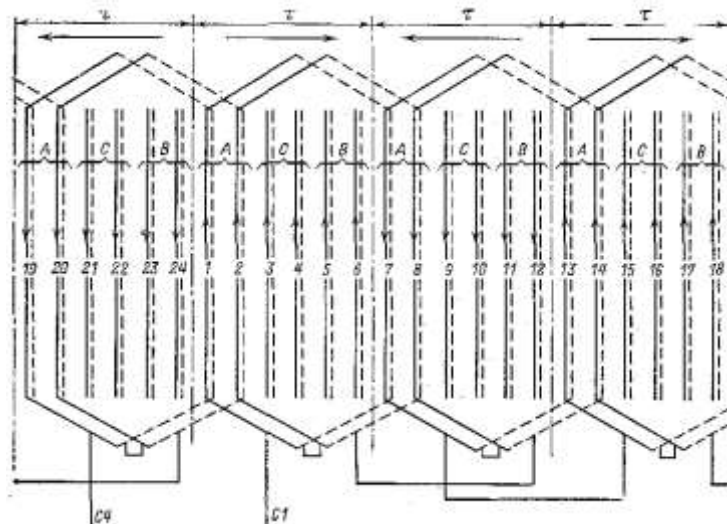


Рис. 2.57. - До побудови схем двошарових обмоток

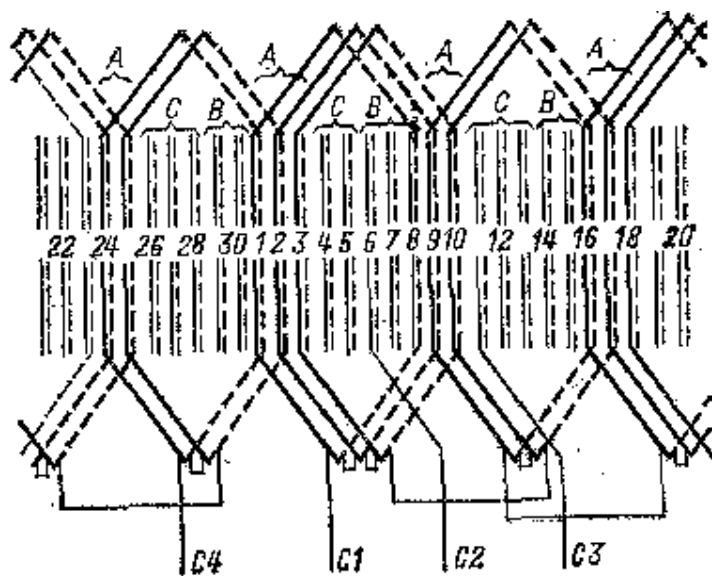
Основними перевагами двошарових обмоток є:

- можливість укорочення кроку, що дозволяє отримати $K_{ук} \neq 1$ і зменшити вплив вищих гармонік в кривій ЕРС, звичайно беруть $y \approx 0,8\tau$;
- збільшення кількості варіантів паралельних віток в порівнянні з одношаровими обмотками;
- рівномірний розподіл лобових частин котушок по колу;
- можливість виконання котушок з однаковою (рівносекційними) і нерівною (не рівносекційними) кількістю витків в шарах;
- лобові частини жорстких і стрижневих двошарових обмоток мають канали, що покращують їх охолодження.

Двошарові обмотки можуть виконуватися з різним числом котушок в котушкових групах фази. Такі обмотки називають двошарові обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу q .

У ряді випадків обмотки з дробовим q застосовують в машинах середньої частоти обертання ($\approx 500 \div 1000 \text{ об/хв}$), коли використовують існуючі штампи заліза як-от машин іншої полюсності.

На рис. 2.58 приведена розгорнута схема обмотки з дробовим q , рівним для фази А $2\frac{1}{2}$.



Подібну побудову в певній послідовності [2] виконують і для інших фаз.

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d}, \quad (2.20)$$

З векторної діаграми ЕРС котушок на рис. 2.59 випливає, що при розрахунку коефіцієнта розподілу обмотки слід брати $N = bd + c$. Для випадку, наприклад, у вираз для $2\frac{1}{2}$ коефіцієнта розподілу необхідно замість q підставити $N = 5$

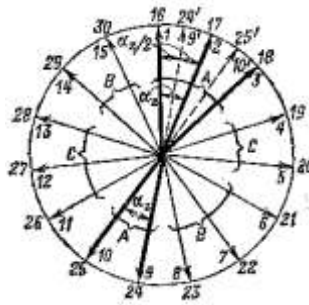


Рис. 2.59. – Векторна діаграма ЕРС котушок фази обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу ($q = 2\frac{1}{2}$)

Основними недоліками усіх викладених вище двошарових обмоток є:

- підвищена складність виготовлення для жорстких і стрижневих обмоток;
- необхідність тримати на вазі сторони m_q (або на полюсному поділу) котушок при укладенні у пази; після повного обходу пазів якоря ці m_q боку котушок укладають у верхній частині паза.

Усунення ускладнення при укладенні двошарових обмоток дозволяє застосування обмоток підвищеної технологічності, які застосовують в основному для двошарових обмоток з цілим q і круглим проводом.

Такі обмотки можна розділити за способом укладення на два типи:

- укладення котушок за певною схемою;
- одно-двошарові.

Укладення котушок за певною схемою передбачає три способи розміщення котушок при укладці: частину котушок укладають на дно паза, частину як завжди і частину котушок займають тільки верхню частину паза. Такий підхід зображений на рис. 2.60, де суцільними лініями показані сторони котушок, що лежать у верхній частині паза, а штриховими - сторони котушок, що розташовуються в нижній частині паза. Для зручності огляду на рис. 2.60 показана фаза А.

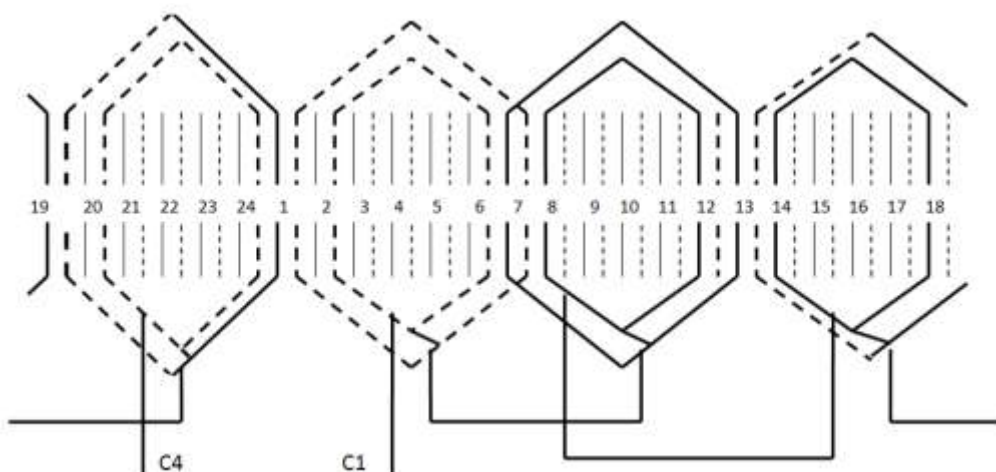


Рис. 2.60. – Схема двошаровою концентричної обмотки: $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$.

Одно-двошарові обмотки теж виконують за певною схемою укладення. Однак, в тих пазах, де лежать сторони котушок, що належать одній фазі, обидві котушки об'єднують в одну, тобто частину котушки виконують подібно одношарової.

Приклад такого виду обмотки наведено на рис. 2.61, де частина (здвоєних) ко-

тушок виконують одношаровими, частина котушок розташовані в нижній частині паза, а частина - у верхній. Для зручності на рис. 2.61 показана тільки фаза А.

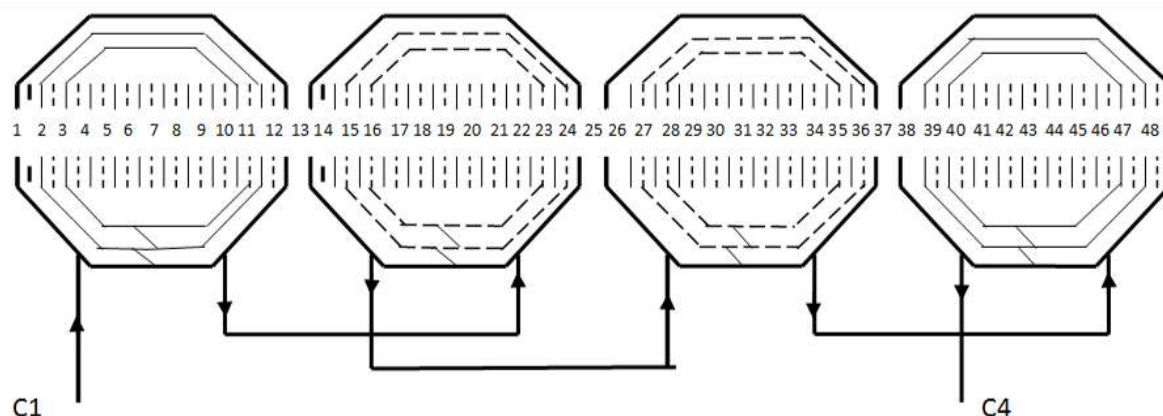


Рис. 2.61. – Схема одно-двошарової обмотки $Z = 48$, $2p = 4$, $q = 4$.

Слід зазначити, що при розрахунку коефіцієнта розподілу використовують число пазів на полюс і фазу в залежності від числа одношарових (великих) котушок [2].

Міждержавний стандарт ГОСТ 2.705-70 дозволяє використовувати як розгорнуті, так і торцеві схеми, а також умовні позначення, які показують з'єднання цілих котушкових груп у вигляді прямокутників. Прямокутник ділиться діагонально навіпіл зліва (знизу) направо. У лівій половині (угорі) вказується номер котушкової групи, а в правій (внизу) - число пазів на полюс і фазу, тобто кількість котушок в групі.

Наприклад, розгорнуту двошарову обмотку з цілим q (на рис. 2.57) можна представити у вигляді умовної схеми на рис. 2.62, де над прямокутниками поставлені напрями ЕРС котушкових груп.

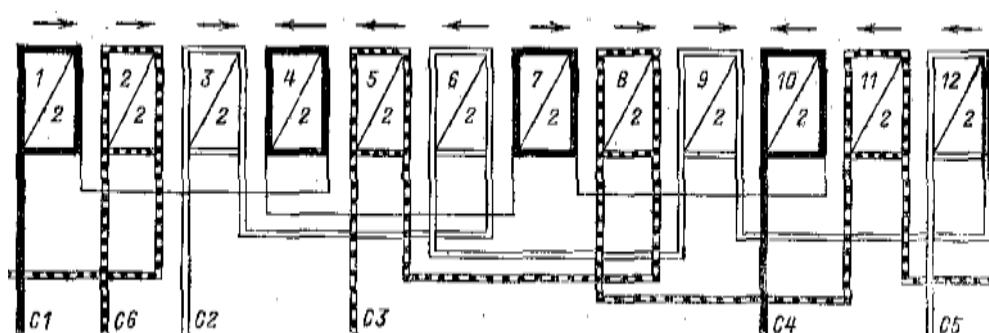


Рис. 2.62. – Умовна схема обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $y = 5$.

Таке уявлення полегшує виконання з'єднань між котушковими групами та організацію кількості паралельних виток.

Оскільки з'єднання котушкових груп у фазах на рис. 2.62 однакові, то міждержавних стандарт ГОСТ 2.705-70 дозволяє зображення тільки однієї фази. Умовну схему на рис. 2.62 згідно рекомендації цього стандарту подано рис. 2.63.

На рис. 2.63 обмотка має число паралельних віток $a = 1$, а на рис. 2.64 - $a = 2$. Таке зображення обмотки показує прийняте число паралельних віток обмотки при проектуванні, а також послідовність при безпосередньому розпаюванні котушок.

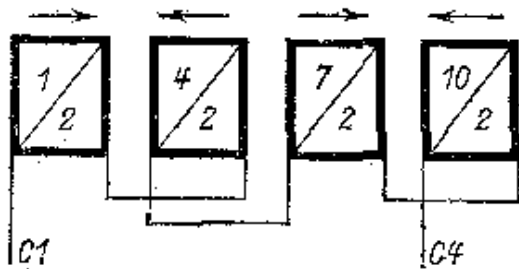


Рис. 2.63. - Умовна схема першої фази А обмотки; друга фаза і третя фаза з'єднуються аналогічно

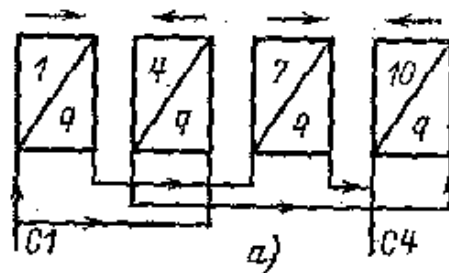


Рис. 2.64. - Схема з'єднання обмотки з $2p = 4$ у дві паралельні вітки $a = 2$

2.7. Проектування якірних обмоток

Безпосереднє проектування якірних обмоток синхронних машин, машин постійного струму і статора асинхронних машин можливо при відомих даних:

- основних розмірах (D і l_δ);
- обраному конструктивному типі обмотки (всипна, жорстка, напівжорстка, стрижнева);
- тип обмотки (петльова, хвильова, складна) та її характеристики (полюсність, число паралельних віток, одношарова, двошарова, підвищеної технологічності).

Корисно пригадати, що проектування якірних обмоток має забезпечити реалізацію такої величини лінійного навантаження A , яка була задана при визначенні основних розмірів ЕМ.

Незважаючи на різноманіття ЕМ можна узагальнити підхід до проектування обмоток. Далі викладається такий підхід з зазначенням особливостей при проектуванні найбільш поширених, класичних типів електричних машин.

2.7.1. Визначення кількості зубців

Провідники якірних (статорних) обмоток розташовуються в пазах. Кількість пазів і зубців збігається, тобто рівні.

□ Для прийняття остаточного числа зубців користуються рекомендаціями, заснованими на багатому досвіді проектування існуючих електричних машин.

Для асинхронних і синхронних машин дають рекомендації у вигляді залежностей зубцевого кроку t_1 від полюсного поділу τ проектованої машини.

На рис. 2.65 наведені залежності $t_1 = f(\tau)$ для асинхронних двигунів з всипною обмоткою [2].

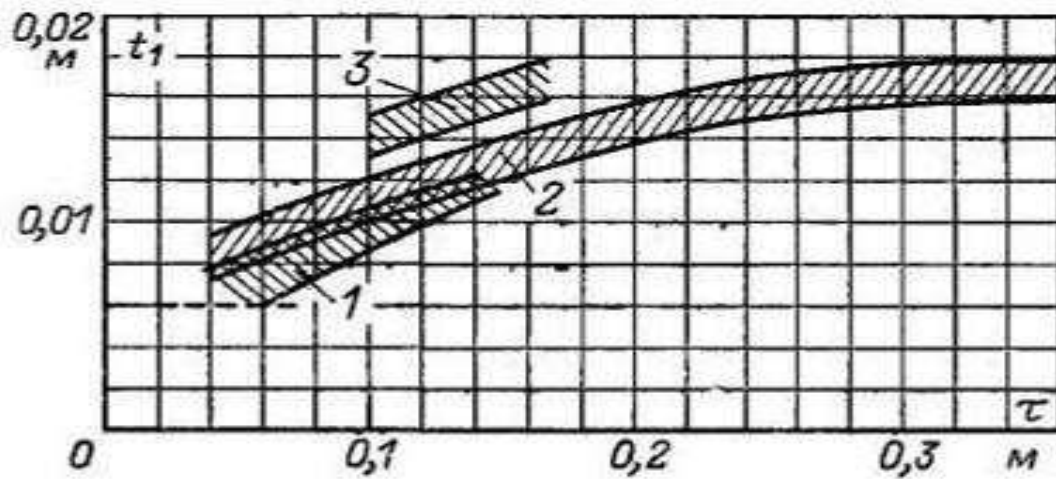


Рис. 2.65.

- 1 - для двигунів з висотою осі обертання $h \leq 90$ мм;
- 2 - для двигунів з висотою осі обертання $90 < h \leq 250$ мм;
- 3 - для двигунів з висотою осі обертання $h \geq 280$ мм.

На рис. 2.66 приведена залежність $t_1 = f(\tau)$ для синхронних машин [2].

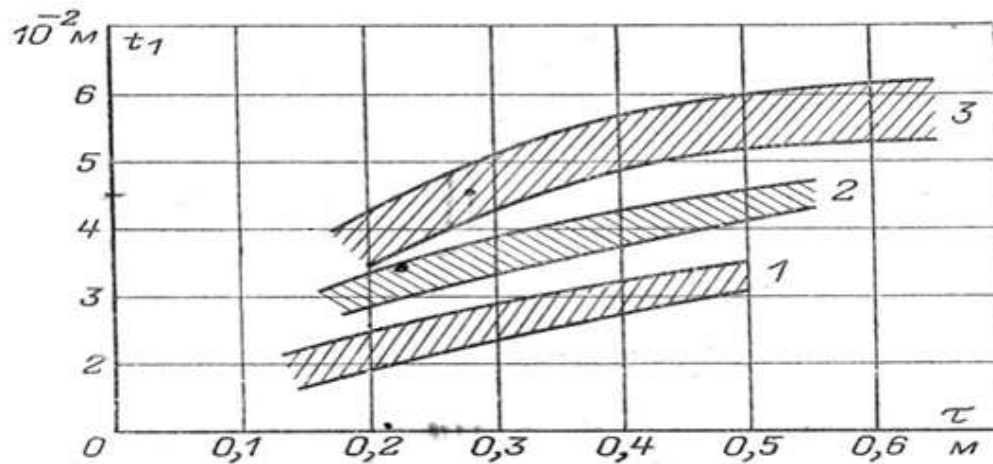


Рис. 2.66.

- 1 - для 13-го та 14-го габаритів;
- 2 - для 16-го та 17-го габаритів;
- 3 - для 18-го та 21-го габаритів.

За рекомендаціями рис. 2.65 і рис. 2.66, а також табл. 2.1 [2] для відповідного типу машини задають зубцеві кроки $t_{1\min}$ і $t_{1\max}$

Таблиця 2.1 – Зубцеві кроки машин

Висота осі обертання h , мм	80...200	225...315	355...500
Зубцевий крок t , мм	10...20	15...35	18...40

□ Відповідно з діапазоном зміни зубцевого кроку знаходять кількість зубців

$$Z_{1\max} \dots Z_{1\min} = \frac{\pi D}{t_{1\min} \dots t_{1\max}}, \quad (2.21)$$

□ Остаточний вибір числа зубців (пазів) являє собою складну задачу, яку вирішують за існуючими рекомендаціями.

Крім специфічних обмежень, обумовлених потужністю, полюсністю, типами обмотки і машини, можна відзначити загальні тенденції.

Вибір більшого числа Z_1 має переваги:

- поліпшує охолодження обмотки при постійній густині струму і зниженні числа провідників в пазу;
- поліпшує форму кривих МРС і ЕРС якоря, що зменшує вплив вищих гармонік.

Вибір меншого числа Z_1 призводить до зворотних наслідків, але знижує витрати ізоляції, підвищує механічну міцність зубців і продуктивність праці при виготовленні обмоток.

Обмотки електричних машин повинні відповідати вимогам рівності опорів та симетрії паралельних віток і фаз.

У асинхронних машинах рекомендують таке число зубців, при яких:

- кількість пазів на полюс і фазу $q = \frac{Z_1}{2pt}$ має бути цілим, тобто $Z_1 = 2ptq$ - ціле число;

- уточнене значення $t_1 = \frac{\pi D}{2ptq}$ не має виходити більш ніж на 10% від раніше прийнятого діапазону;

- обмотки з дробовим q (зазвичай $2\frac{1}{2}$ і $3\frac{1}{2}$) виконують тільки в двигунах великої полюсності;

- вибір числа зубців статора Z_1 і зубців ротора Z_2 повинні бути обрані з урахуванням рекомендацій табл. 2.2; в цьому випадку забезпечують прийнятні віброакустичні характеристики машин за рахунок зниження синхронних і асинхронних моментів від вищих гармонік [2].

При виборі кількості зубців статора (якоря) синхронних машин рекомендують:

- співвідношення $\frac{Z_1}{m \cdot a}$ - ціле число;
- при $2p < 8$ вибирати кількість Z_1 таку, яка забезпечує ціле число пазів на полюс і фазу;

- кількість паралельних віток має бути при цілому $q - \frac{2p}{a}$ - ціле число, а при дробовому $q - \frac{2p}{ad}$ - ціле число;

- для зручності сегментування бажано, щоб Z_1 розкладалося на прості множники (2, 3, 5);

- кількість пазів повинно бути кратним числу роз'єм статора.

При проектуванні якірних обмоток машин постійного струму слід виконувати рекомендації:

- число пазів повинно забезпечувати парне число в співвідношенні N/Z ;
- за умовами комутації $At_1 \leq 1500 \dots 1600A$ при $D < 1m$ і $At_1 \leq 2000A$ при $D > 1m$.

Враховуючи зазначені рекомендації, остаточно приймають Z_1 .

Таблиця 2.2 – Рекомендовані числа пазів короткозамкнених асинхронних двигунів

2р	Число пазів статора	Число пазів ротора	
		Пазы без скося	Пазы со скосям
2	12	9,* 15*	—
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22*	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	24	15*, (16*), 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	12	9*	15*
	18	10* 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105

2р	Число пазів статора	Число пазів ротора	
		Пазы без скося	Пазы со скосям
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
14	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103
	126	106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158	107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145
16	96	84, 86, 106, 108, 116, 118	90, 102
	144	120, 122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172	138, 150

Примечания: 1 В скобках взяты числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.
2 Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые в основном в машинах малой мощности

2.7.2. Уточненне значення зубцевого кроку

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}, \quad (2.22)$$

□ Число провідників обмотки в пазу

□ В машинах змінного струму визначають ефективне число провідників у пазу (по ним протікає струм паралельної гілки)

$$u_n = \frac{A \cdot t_1}{i_a} = \frac{\pi D \cdot a \cdot A}{Z_1 \cdot I_{нф}}, \quad (2.23)$$

де $i_a = I_{нф} / a$ - струм паралельної гілки;

$$I_{нф} = \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} - \text{номінальний фазний струм.}$$

Знайдене число u_n округлюють до найближчого цілого числа, причому парному або непарному при одношарових обмотках якоря. При двошарових обмотках u_n повинно бути парним, бо в іншому випадку обмотку виконують не рівносекційною.

В машинах постійного струму визначають ефективне число провідників по всьому колу якоря

$$N = \frac{\pi D \cdot 2a \cdot A}{I_a}, \quad (2.24)$$

де $2a$ - число паралельних провідників обмотки (завжди парне).

При цьому число N округлюють до цілого числа, а також виконувати співвідношення N/Z - ціле число.

2.7.3. Кількість витків обмотки якоря

□ Послідовна кількість витків у фазі машин змінного струму

$$W_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2m \cdot a}, \quad (2.25)$$

□ В машинах постійного струму при проектуванні використовують кількість провідників всієї обмотки якоря - N , але якщо користуватися загальним виразом для ЕРС обмотки якоря, куди входить кількість послідовних витків в паралельній вітті, то

$$W_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{(2 \cdot 2a)} = \frac{N}{4a}, \quad (2.26)$$

де $2a$ - повне число паралельних гілок, яке визначається типом обмотки.

2.7.4. Уточнене значення лінійної навантаження

□ Для машин змінного струму

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot I_{нф}}{\pi \cdot D} = \frac{Z_1 \cdot u_n \cdot I_{нф}}{a \cdot \pi \cdot D}. \quad (2.27)$$

□ Для машин постійного струму

$$A = \frac{N \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D} = \frac{2 \cdot u_n \cdot Z \cdot w_c \cdot I_a}{\pi \cdot D}. \quad (2.28)$$

□ Уточнене значення A не повинно відрізнятися більш ніж на $\pm 5\%$ від заданого раніше. Уточнене значення A використовується в подальших розрахунках.

2.7.5. Обмотковий коефіцієнт

В машинах змінного струму визначають загальний обмотковий коефіцієнт як добуток трьох коефіцієнтів: укорочення K_{yk1} , розподілу K_{p1} і скосу $K_{ск1}$. Індекс «1» вказує, що ці коефіцієнти визначають для першої гармоніки магнітного поля, яка бере участь в перетворенні енергії.

□ Коефіцієнт скосу

Скис пазів щодо осі валу застосовують у статорі або роторі машин малої потужності з метою зменшення амплітуд поля гармонік зубцевого порядку - $\nu_z = Zk/p \pm 1$. Коефіцієнти укорочення і розподілу цих гармонік такі ж як і для першої гармоніки, але застосування скосу пазів в межах одного зубцевого кроку істотно знижує амплітуди зубцевих гармонік ЕРС. Для амплітуди першої гармоніки скис впливає незначно, тому що близький до одиниці через незначний зсув пазів для першої гармоніки.

Для першої гармоніки коефіцієнт скосу визначають

$$K_{ск1} = \frac{\sin\left(\frac{b_{ск}}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b_{ск}}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} = \frac{\sin \frac{\gamma_{ск}}{2}}{0,5 \cdot \gamma_{ск}} \approx 1 - \frac{\gamma_{ск}^2}{24}, \quad (2.29)$$

де $b_{ск}$ - величина дуги, на яку зроблено зсув, м; τ - полюсна поділлка, м;

$\gamma_{ск} = \frac{b_{ск}}{\tau} \cdot \pi$ - кут зсуву.

Слід зазначити, що скис пазів не тільки зменшує амплітуди вищих гармонік, але і сприяє зменшенню шумів при роботі машини.

□ Коефіцієнт укорочення

Виконання обмотки з кроком y , відмінним від полюсної поділки τ , призводить до незначного зменшення ЕРС першої гармоніки і істотного зниження амплітуд вищих гармонік. Укорочення кроку можливо виконати в двошарових обмотках, і його враховують коефіцієнтом укорочення для першої гармоніки

$$K_{yk1} = \sin \frac{\pi\beta}{2}, \quad (2.30)$$

де $\beta = y/\tau$ - укорочення кроку щодо полюсного поділу.

Зазвичай приймають $\beta \approx 0,8\tau$.

Особливо відзначимо, що в одношарових обмотках $K_{yk1} = 1$

Для одно-двошарових обмоток, що виконуються без підйому кроку, з однією великою котушкою приймають $\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q}$

□ Коефіцієнт розподілу

При $q > 1$ котушки, що належать одній фазі (займають свою фазну зону), утворюють котушкову групу. ЕРС котушкової групи представляє геометричну суму ЕРС окремих котушок. Це обумовлено фазовим зсувом ЕРС сусідніх котушок на електричний кут $\gamma = 2\pi p/Z$. Зменшення сумарної ЕРС котушкової групи в порів-

нянні з арифметичною сумою ЕРС котушок враховують коефіцієнтом розподілу для 1-ої гармоніки ЕРС

$$K_p = \frac{\sin \frac{q\gamma}{2}}{q \cdot \sin \frac{q\gamma}{2q}} = \frac{\sin \frac{a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2q}}, \quad (2.31)$$

де $a = q \cdot \gamma$ - кут фазної зони в електричних градусах.

Можливе виконання для трифазної машини обмотки у вигляді трьохзонної або шестизонної. Перевагу слід віддавати шестизонній обмотці, оскільки в цьому випадку K_p ближчий до одиниці і визначають його

$$K_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2mq}}, \quad (2.32)$$

□ У загальному випадку обмотувальний коефіцієнт машин змінного струму визначають

$$K_{об1} = K_{yk1} K_{p1} K_{ck1}. \quad (2.33)$$

2.7.6. Уточнення величини потоку на пару полюсів

□ Для машин змінного струму

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_n}{4K_B \cdot W_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1}. \quad (2.34)$$

де $K_E = E/U$; K_B - коефіцієнт форми поля.

□ Для машин постійного струму

$$\Phi = \frac{a \cdot E_a}{p \cdot N \cdot n_n}. \quad (2.35)$$

2.7.7. Уточнена величина індукції в повітряному проміжку

Враховуючи дискретність чисел u_n , W_1 або N , що призводить до відхилення від прийнятої величини лінійного навантаження A при визначенні основних розмірів ЕМ, необхідно уточнити індукцію у повітряному проміжку B_δ . Уточнення B_δ здійснюється таким чином, що добуток уточненого лінійного навантаження A на уточнену індукцію в повітряному проміжку B_δ залишається рівним раніше прийнятому при розрахунку активних розмірів.

□ Для машин змінного струму

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}. \quad (2.36)$$

де $\alpha_{\delta} = 2/\pi$ - для асинхронних машин, а для синхронних залежить від величин повітряного проміжку та відношення δ/τ [2].

□ Для машин постійного струму

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}. \quad (2.37)$$

де $\alpha_{\delta} = b_p' / \tau$ - коефіцієнт полюсного перекриття, величину якого приймають за рекомендаціями [2].

У випадках, коли B_{δ} уточнена і прийнята відрізняються більш ніж на 5%, необхідно змінити число u_n і повторити розрахунок.

2.7.8. Ефективний переріз провідника обмотки

У загальному випадку розрахунок перерізу провідника витка обмотки якоря можна обмежити визначенням величини його ефективного перерізу $q_{эфф}$. При цьому існують 2 принципових підходи:

- через задану густину струму J А/мм² за рекомендаціями або, використовуючи дані прототипу;

- через рекомендовану величину добутку лінійного навантаження на густину струму $A \cdot J$ (тепловий фактор).

□ За попередньо прийнятій густині струму:

- для машин змінного струму

$$q_{эфф} = \frac{I_n}{a \cdot J}; \quad (2.38)$$

- для машин постійного струму

$$q_{эфф} = \frac{I_a}{2a \cdot J}. \quad (2.39)$$

Можливість використання цього підходу вимагає попереднього визначення номінального струму якоря за вихідними даними.

□ Розрахунок $q_{эфф}$ по тепловому фактору $A \cdot J$ дозволяє врахувати на стадії проектування перепад температури нагріву між провідниками паза і поверхнею ізоляцій, зверненої до стінок паза або радіальним каналам.

При проектуванні асинхронних трифазних двигунів можна скористатися залежностями $A \cdot J = f(D_a)$, рис. 2.67 [2].

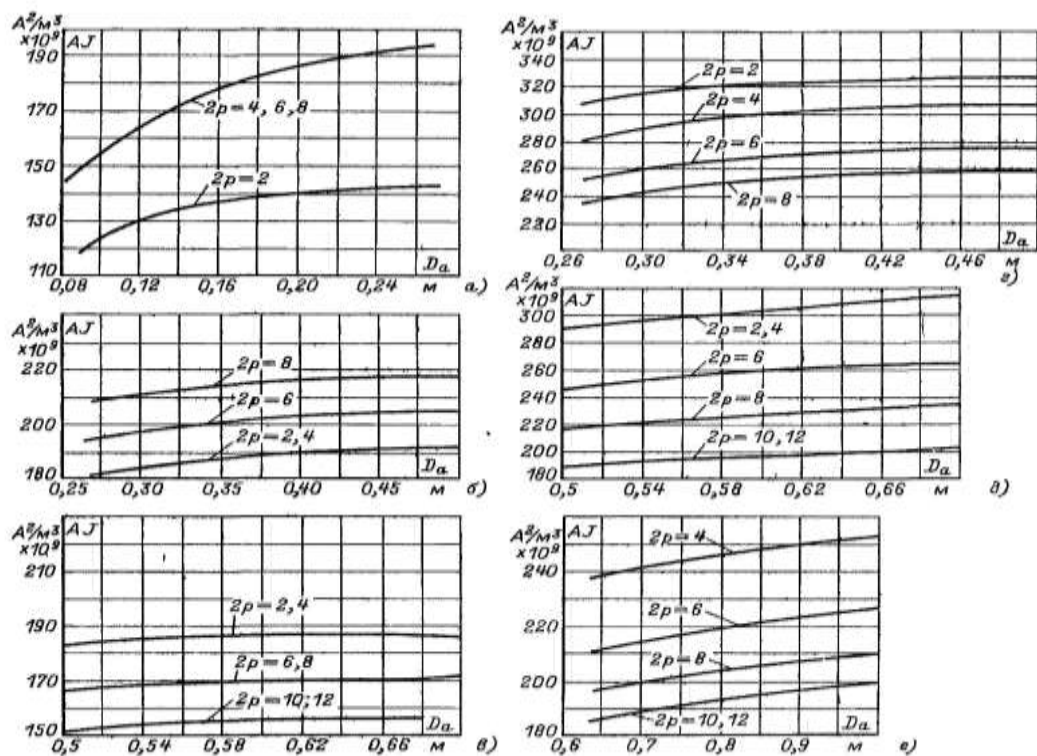


Рис. 2.67. - Середні значення добутку $A \cdot J$

а- з ступенем захисту IP44 $h \leq 132 \text{ мм}$, б- теж саме при $h = 160 - 250 \text{ мм}$, в- теж саме при $h = 280 - 355 \text{ мм}$ (з ротором що продувається), г- з ступенем захисту IP23, при $h = 160 - 250 \text{ мм}$, д- теж саме при $h = 280 - 355 \text{ мм}$, е- теж саме при $U = 600 \text{ В}$.

Аналогічна залежність $A \cdot J = f(\tau)$ для синхронних машин наведена на рис. 2.68 [2].

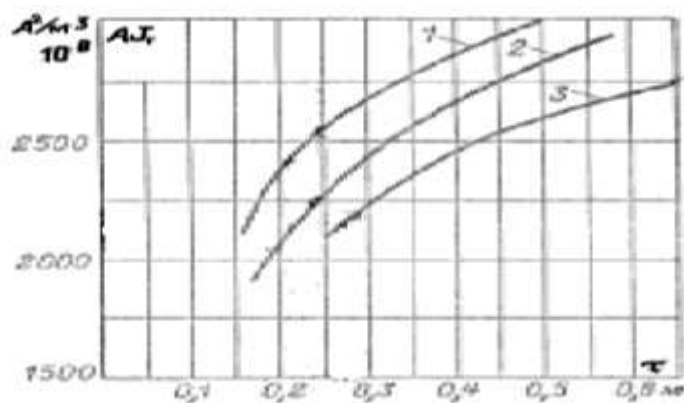


Рис. 2.68. – Залежність $A \cdot J = f(\tau)$

- 1 - для 13-го та 14-го габаритів;
- 2 - для 16-го та 17-го габаритів;
- 3 - для 18-21-го габаритів.

Для машин постійного струму використовують аналогічну залежність $A \cdot J = f(D)$, де D - діаметр якоря.

За рекомендованої величиною теплового фактора густина струму

$$q_{\text{эфф}} = \frac{A \cdot J}{J}. \quad (2.40)$$

2.7.9. Вибір кількості елементарних провідників

Для прямокутних провідників, якщо $q_{\text{эфф}} \geq 18...20 \text{ мм}^2$, то ефективний переріз провідника обмотки якоря забезпечують сумою перерізів елементарних провідників $q_{\text{эл}}$ у паралель, тобто числом елементарних провідників $n_{\text{эл}}$:

$$q_{\text{эфф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}. \quad (2.41)$$

Таке дроблення ефективного перерізу на декілька $n_{\text{эл}}$ елементарних обумовлено необхідністю зниження додаткових втрат від вихрових струмів у самих провідниках (зниження впливу ефекту витіснення). При цьому в машинах змінного струму більша сторона провідника розташовується паралельно дну паза, тобто плазом.

□ У всіпних обмотках діаметр проводу не повинен перевищувати 1,4...1,6 мм. Така рекомендація обумовлена тим, що при автоматичному або механічному укладанні провідники, діаметри яких вище зазначених меж, мають жорсткість, яка не дозволяє забезпечити високий коефіцієнт заповнення паза провідниками.

□ Конкретний вибір розмірів провідників жорсткої або стержньової якірної обмотки по стандартному сортаменту слід проводити після визначення розмірів пазу, тобто розрахунку розмірів зубцевої зони.

2.7.10. Розрахунок розмірів зубцевої зони робочої обмотки

Цей розрахунок по суті призначений для визначення можливості розміщення обмотки в пазу і розмірів листів електротехнічної сталі, з яких шихтують магнітопровід якоря (статора для асинхронних машин).

Незважаючи на різні конструктивні типи обмоток якоря існує на першому етапі розрахунку загальний підхід до визначення розмірів паза, а особливості прийнятої форми паза (напівзакритий, відкритий, напіввідкритий і т.д.) враховують на другому етапі при перевірці розміщення провідників у пазу.

□ Загальний підхід до розрахунку розмірів пазів полягає у розрахунках висоти ярма і ширини зубців. Саме ці розміри дозволяють отримати основні контури розмірів пазів для подальшої деталізації з урахуванням форми паза.

Для знаходження зазначених розмірів використовують рекомендовані величини індукції у ярмі та зубцях [2] і вже уточнені величини індукції B_{δ} і магнітного потоку Φ у повітряному проміжку.

□ Висота ярма якоря (статора в асинхронних машинах)

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{cm} K_c}. \quad (2.42)$$

де B_a - рекомендована і уточнена після попередніх розрахунків індукція в ярмі; l_{cm} - довжина пакетів магнітопроводів при наявності радіальних охолоджуючих каналів, при відсутності радіальних каналів; $K_c = 0,95...0,97$ - коефіцієнт заповнення сталлю.

□ Ширину зубця розраховують для випадків:

- з паралельними сторонами (паз напівзакритий, трапецеїдальний або овальний, обмотка всіпна)

$$b_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{Z1} \cdot K_c \cdot l_{cm1}}. \quad (2.43)$$

де B_{Z1} - прийнята або уточнена після попередніх розрахунків індукція в зубці;

- зубець складної конфігурації (наприклад, паз прямокутний, а зубець трапецеїдальної форми)

$$b_{Z1min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{Z1max} \cdot K_c \cdot l_{cm1}}. \quad (2.44)$$

де B_{Z1max} - прийнята найбільша індукція у вузькому перерізі зубця.

□ Висота паза

- для машин змінного струму

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a, \quad (2.45)$$

- для машин постійного струму

$$h_n = \frac{D - (d_{\epsilon} + 2h_a)}{2}, \quad (2.46)$$

де d_{ϵ} - попередньо розрахований діаметр валу, на якому розташовується пакет магнітопроводу ротора.

2.7.11. Розміри пазів

Подальше визначення розмірів пазів (трапецеїдальні, овальні або прямокутні) залежить від конструктивного типу обмоток (всипна, жорстка, напівжорстка, стрижнева).

□ Розміри пазів всипних обмоток подані на рис. 2.69, де показані можливі форми зубців машин змінного струму з всипними обмотками із зазначенням прийнятих їх розмірів у штампі:

- ширину шліца b_{uu} вибирають з умови вільного проходження провідника обмотки в паз і визначають як $b_{uu} = d_{i3} + (1,5...2)мм$, що становить $b_{uu} = 1,5...4,0мм$;

- висоту шліца виконують в залежності від висоти обертання $h_{uu} = 0,5...1,0мм$;

- висоту клиновий частини паза виконують $h_{\kappa} = 2,5...3,5мм$ згідно стандартизованому ряду;

- ширина паза

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{Z1}; \quad (2.47)$$

- ширина паза при $\beta = 45^\circ$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_n - b_{uu}) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi}. \quad (2.48)$$

Отримані розміри округлюють до часток міліметра.

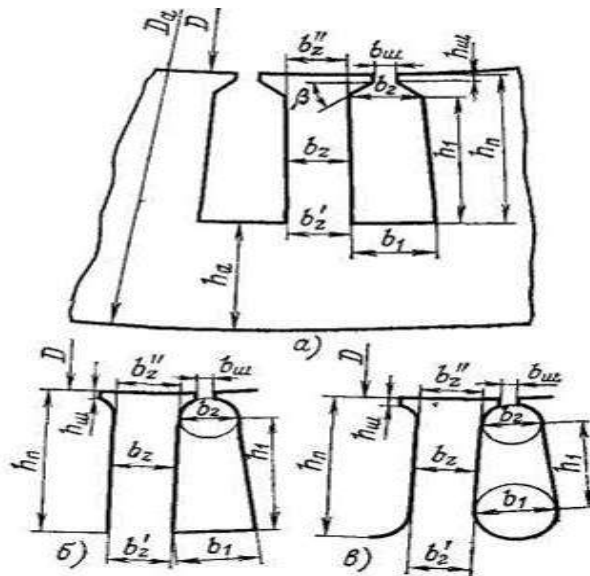


Рис. 2.69. – Розміри пазів для всипних обмоток

Розміри пазів всипної обмотки можуть бути визначені графоаналітичним методом (рис. 2.70), де $t_1' = t_1 \cdot \frac{D_a}{D}$ Порядок побудови паза впливає з рис. 2.70. Для більшої точності побудова рекомендується в масштабі 1:10.

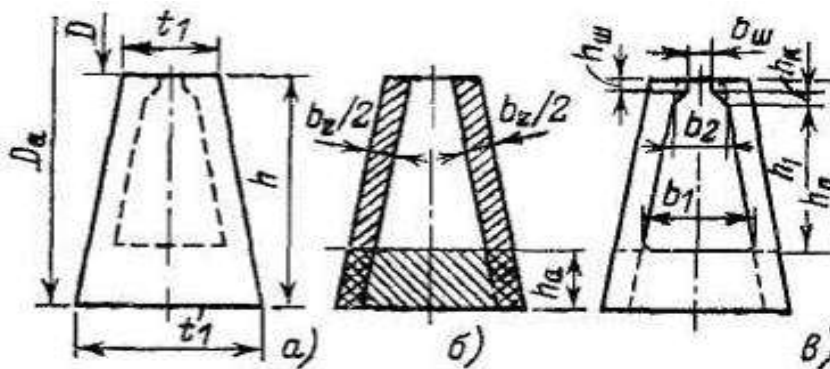


Рис. 2.70. – Графоаналітичний метод

Розміри напівзакритих пазів овальної форми якоря машини постійного струму показані на рис. 2.71. Розміри ширини і висоти шліців приймають такими ж, як і для машин змінного струму. Величини радіусів визначають:

- більшого

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2h_u) - Z \cdot b_z}{2(Z + \pi)}, \quad (2.49)$$

- меншого

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_n) - Z \cdot b_z}{2(Z - \pi)}, \quad (2.50)$$

- інші необхідні розміри видно з рис. 2.71.

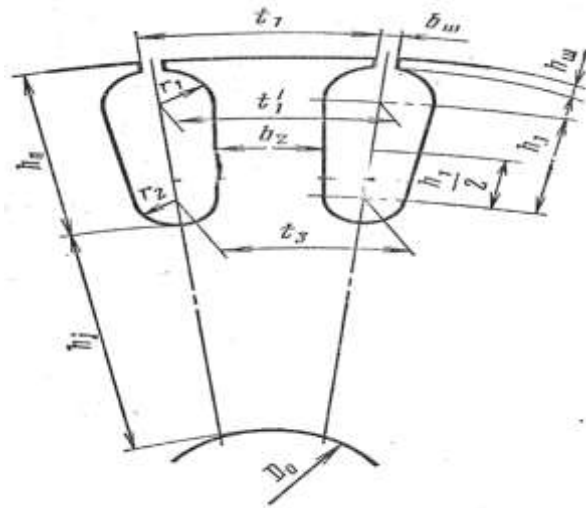


Рис. 2.71. – Розрахунок розмірів пазів

□ Розміри прямокутних пазів подані на рис. 2.72 та рис. 2.73. Враховуючи, що стінки паза паралельні, відомі мінімальна ширина зубця і висота ярма, визначити розміри паза під обмотку з урахуванням висоти шліца $h_{ш}$ і клина h_k можна, користуючись рис. 2.72.

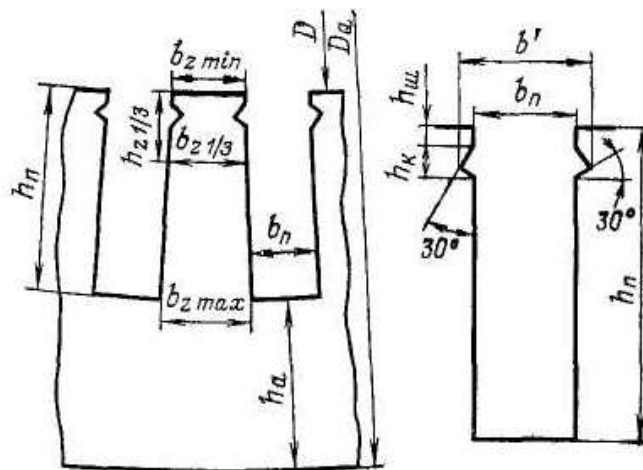


Рис. 2.72. – Розміри пазу під обмотку

Аналогічний підхід до визначення розмірів напіввідкритих пазів для напівжорсткої обмотки, поданий на рис. 2.73.

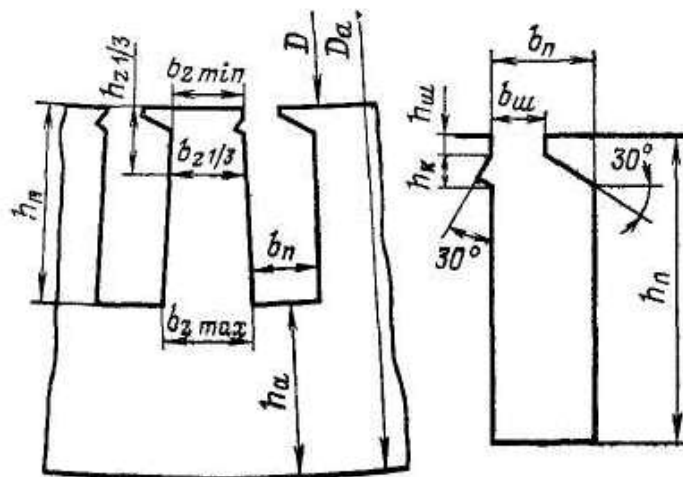


Рис. 2.73. – Розміри прямокутного паза

□ При визначення розмірів паза графоаналітичним способом зручно скористатися кутом $\gamma = 360^\circ/Z$, який по суті є зубцевим кроком в градусах і не залежить від величини діаметра, де визначають зубцевий крок в метрах або міліметрах.

2.7.12. Вибір розмірів провідників та перевірка їх розміщення в пазах

□ Для всипних обмоток, як вказувалось вище, діаметр самого провідника не повинен перевищувати 1,4...1,6 мм. Виходячи з цієї рекомендації, ефективний переріз виконують з $n_{ел} \leq 4...8$ ізолюваних елементарних провідників, які вільно повинні проходити через ізолюваний шліц (або відкриття паза).

Товщина ізолюваного елементарного провідника дорівнює $d_{із} = d_e + 2\Delta_{із}$ де d_e - діаметр голого проводу, обраного зі стандартного ряду (сортаменту); $2\Delta_{із}$ - двостороння товщина ізоляції проводу, яку рекомендують в залежності від марки та класу нагрівостійкості ізоляції (табл. 2.5 і 2.6 [2])

Запис обраного проводу - марка $\times n_{ел} \times d / d_{із}$.

Сумарний переріз $n_{ел}$ провідників повинен максимально наближатися до розрахованого ефективного перерізу.

Реальний переріз $n_{ел} \cdot q_{ел}$ дозволяє уточнити густину струму

$$J = \frac{I_{1н}}{a \cdot n_{ел} \cdot q_{ел}}. \quad (2.51)$$

Далі необхідно перевірити можливість розміщення всипної обмотки в пазу. Це здійснюють за допомогою емпіричного коефіцієнта заповнення паза провідниками

$$K_3 = \frac{d_{із} \cdot n_{ел} \cdot u_n}{S'_n}, \quad (2.52)$$

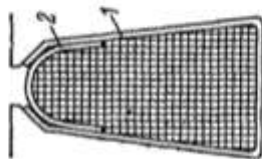
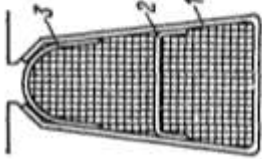
де S'_n - площа паза під провідники.

Для обчислення S'_n необхідно уточнити зменшення площі паза під провідники за рахунок допуску на шихтовку і збірку сердечників, площ пазової і міжшарової ізоляції.

Допуск на складання і шихтовку Δ приймають від 0,1 мм до 0,3 мм, в залежності від висоти обертання ЕМ [2].

Розміри корпусної (пазової) ізоляції приймають за пропонованою специфікацією [2], зміст якої залежить від висоти обертання, класу нагрівостійкості ізоляції і потужності. Наприклад, для всипних обмоток статорів асинхронних двигунів з $h \leq 250$ мм і напругою до 660 В специфікація подана у табл. 2.3 [2].

Таблиця 2.3 – Специфікація ізоляції для всипних обмоток

Рисунок	Тип обмотки	Высота осей проточки, мм	Позиция	Материал					Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя толщина, мм	
				Наименование, марка			Класс Н	Класс F				Класс В
				Изофлекс	Имидофлекс	»						
	Однослой- ная	50—80	1	Пленкоцеллофан				0,2	1	0,2		
			2	Изофлекс	Имидофлекс	»		0,3	1	0,3		
		90—132	1	Пленкоцеллофан				0,25	1	0,25		
			2	Изофлекс	Имидофлекс	»		0,35	1	0,35		
		160	1	Пленкоцеллофан				0,4	1	0,4		
			2	Изофлекс	Имидофлекс	»		0,5	1	0,5		
	Двухслойная	160—250	1	Пленкоцеллофан				0,4	1	0,4		
			2	Изофлекс	Имидофлекс	»		0,4	1	0,4		
			3	»	»	»		0,5	1	0,5		

Примечание. Междупазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняются из материала, указанного для под. 1 рисунка.

Примечание. Междупазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняются из материала, указанного для сл. 1 рисунка.

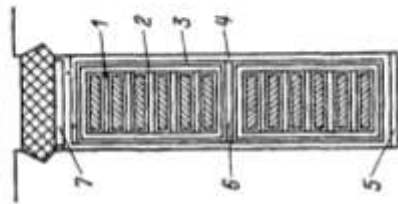
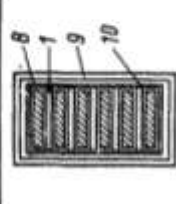
Розміщення вважають задовільним, якщо:

- $K_3 \leq 0,69...0,7$ - механічне або автоматичне укладання обмотки;
- $K_3 \leq 0,71...0,75$ - ручне укладання обмотки.

□ Вибір розмірів прямокутних провідників обмотки слід починати з вибору специфікації паза, у якій вказані матеріал і розміри ізоляції. Слід зазначити, що вибір тієї чи іншої специфікації залежить від форми паза (відкритий або напіввідкритий), від класу нагрівостійкості і виду корпусної (пазової) ізоляції (гільзова або безперервна), від номінальних напруг і потужності, а також від виду струму (змінний або постійний) електричної машини.

Приклад специфікації паза з гільзовою ізоляцією обмотки статора машин змінного струму напругою до 660 В класу нагрівостійкості В, F і H наведено у табл. 2.4 [2]. Аналогічні таблиці наведені для машин постійного струму [2].

Таблиця 2.4 – Специфікація пазу з гільзовою ізоляцією

Клас В нормального в устатковування ізоляційного									
Частина обмотки	Позиція	Матеріал		Кількість шарів			Товщина в мм		
		Назив матеріалу	Марка	Товщина, мм	по ширині	по висоті	по ширині	по висоті	по висоті
	1	Виткована ізоляція							
	2	Стеклоплетена лент	ЛЭС	0.1			0.2		0.2
	3	Міккафолія	МФГ	0.2			1.4		1.4
	4	Двустороння товщина ізоляції пазової частини катушки			1 шар вразбужку 3.5 оборота		1.6		1.6
	5	Електроніт							
	6	Електроніт							
	7	Лакостеколоніт	ГФГС-ЛСБ В	0.2 0.5 0.5	2 —	3 1 1	0.4 —		0.6 0.5 0.5
	8	Міккафолія	ЛФ4-11	0.17					1.4
	9	Стеклоплетена лент	ЛЭС	0.10					0.4
	10	Стеклоплетена лент	ЛЭС	0.10					0.2
	11	Двустороння товщина ізоляції пазової частини катушки			2 шар вразбужку 1 шар вразбужку		1.4 0.4 0.2 0.5 2.5		1.4 0.4 0.2 0.5 2.5

Знаючи розміри паза, ізоляції в пазу і допуск на шихтовку, визначають ширину паза під провідник (один або два).

Такий підхід дозволяє прискорити пошук відповідних розмірів провідників з необхідним ефективним або елементарним перерізом.

З метою зменшення втрат від ефекту витіснення в машинах змінного струму провідники в пазу не повинні перевищувати переріз $(17...20) \text{ мм}^2$ і розташовуватися плазом щодо дна паза, рис. 2.74.

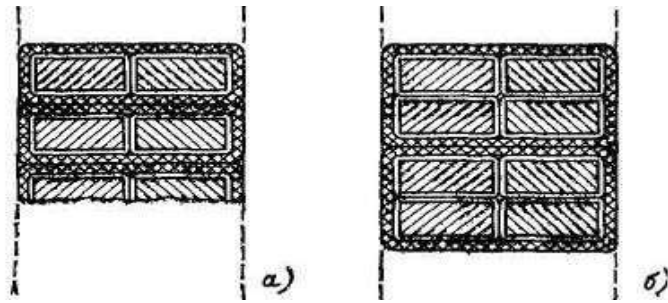


Рис. 2.74. – Взаємне розташування провідників в котушці: а) $n_{el} = 2$; б) $n_{el} = 4$.

У машинах постійного струму більша сторона провідника обмотки якоря може розташовуватися плазом щодо стінки паза. Приклад специфікації паза обмотки якоря машин постійного струму з відкритими пазами для висот обертання $h=(225...315)$ мм і напругою до 660 В наведено на рис. 2.13.

У тих випадках, коли вибраний провідник (через дискретності розмірів) не може бути розміщений в пазу або не займає виділену площу паза, то необхідно змінити розміри паза, змінюючи величину індукції в зубці. Крім того, якщо є можливість, то змінити розміри паза, міняючи індукцію в зубцях або ярмі, густину струму в провідниках, розрахункову довжину, або величину індукції у повітряному проміжку B_δ .

Остаточне розміщення провідників прямокутного перерізу закінчується складанням специфікації, в якій вказують розміри рекомендованої ізоляції, провідників і клину. Таким чином, визначають розміри паза по ширині і висоті, тобто можливість розміщення провідників обмотки.

Специфікація паза - обов'язкова частина конструкторської документації, що складається з рисунку та таблиці.

Рисунок зображує поперечний переріз паза із зазначенням його шліца, розташування провідників і усіх видів ізоляції. Всі складові поперечного перерізу паза нумеруються.

У таблиці, згідно нумерації на рисунку, приводять назви і марки конструктивних та ізоляційних матеріалів, їх розміри і спосіб застосування (нахлест, в розбіжку і т.і.) з урахуванням обраного класу нагрівостійкості. Сюди ж, згідно з номером позиції, вносять марку і розміри застосовуваного для обмотки провідника.

У правій частині таблиці вказують розміри кожної виділеної позиції по ширині і висоті паза.

З урахуванням допусків на укладання підсумовуються всі розміри по ширині і по висоті, тобто визначають розміри паза у світлі (табл. 2.3, табл. 2.4).

Цей повний перелік застосовують для жорстких і стрижневих обмоток. Для всипних обмоток він істотно спрощується.

Вибір розмірів провідників здійснюється у процесі проектування обмоток по таблицях стандартного сортаменту, а характеристики ізоляції паза приводять у довідковій літературі з урахуванням типу обмотки, номінальної напруги, висоти осі обертання і класу нагрівостійкості машини.

РОЗДІЛ № 3. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА

3.1. Мета і загальний підхід до розрахунку магнітного кола

Одним з основних факторів, які обумовлюють перетворення енергії у електричних машин, є наявність електромагнітного поля. Це поле створюється магніторухійними силами (МРС) обмоток статора і ротора.

Наявність нерівномірного повітряного проміжку між нерухомими і рухомими частинами машини, нелінійність властивостей електричних сталей магнітопроводу, дискретний розподіл провідників обмоток по колу розточки статора і поверхні ротора, а також ряд технологічних чинників ускладнюють точний розрахунок МРС, необхідної для створення потрібної величини електромагнітного поля, тобто магнітного потоку Φ . Тому при розрахунку МРС користуються спрощеними припущеннями, які забезпечують досить прийнятні практичні результати.

У перетворенні енергії бере участь основне (або взаємоіндукції) поле, яке зчеплене з витками обмоток статора і ротора.

Метою розрахунку магнітного кола є визначення величини МРС, а через неї необхідний струм намагнічування для асинхронних машин або збудження для синхронних машин і машин постійного струму, які створюють необхідний основний магнітний потік в повітряному проміжку. Цей магнітний потік взаємодіє із струмами обмоток і обумовлює певну величину електромагнітної (або розрахункової) потужності машини.

Величину електромагнітної потужності, яка в загальному випадку дорівнює

$$S_{EM} = mE_1 I_1, \quad (3.1)$$

чисельно визначають за вихідними даними, а необхідну величину МРС знаходять по розрахунку магнітного потоку

$$\Phi = \frac{E_1}{K_\sigma \cdot f_1 W_1 K_{об1}}, \quad (3.2)$$

Оскільки інтеграл представляє суму МРС ділянок, яку знаходять, слідуючи по замкненому шляху силової лінії основного потоку, то з урахуванням наявності ділянок з неоднаковими напруженостями поля для електричних машин зручно (3.3) записати у вигляді

$$\sum F = \sum_{i=1}^{i=n} H_i l_i, \quad (3.3)$$

де n - кількість ділянок з певними величинами напруженості H_i і довжиною магнітної силової лінії у i -тій ділянці - l_i .

Таким чином, щоб визначити величину $\sum F$, необхідно знати конфігурацію і особливості магнітного кола конкретної машини.

Звичайно, МРС машини знаходять на пару полюсів, а магнітні силові лінії для цього випадку зображують виділяючи сектор в $1/2p$ частини поперечного перерізу магнітного кола машини.

На рис. 3.1 приведена аксонометрична проекція магнітного кола асинхронних

машин і синхронних неявнополюсних машин. На рис. 3.2 показана магнітна силова лінія для них на $1/2p$ частини поперечного перерізу магнітопроводу.

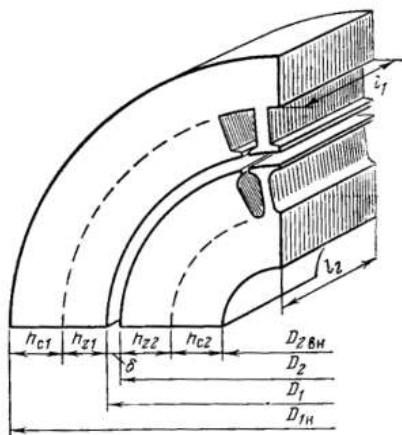


Рис. 3.1. - Аксонометрія АМ і НСМ

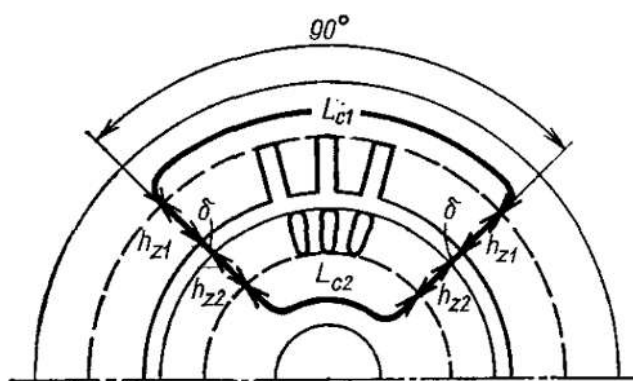


Рис. 3.2. - Магнітна лінія АМ і НСМ

Аналогічні рис. 3.3 і рис. 3.4 приведені для синхронних явнополюсних машин, а на рис. 3.5 і рис. 3.6 - для машин постійного струму.

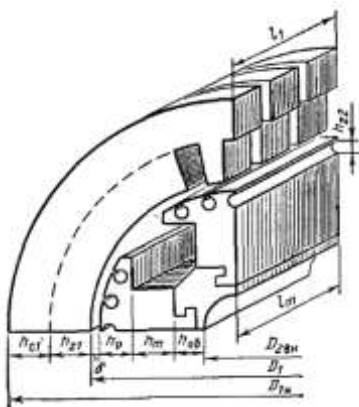


Рис. 3.3. - Аксонометрія ЯСМ

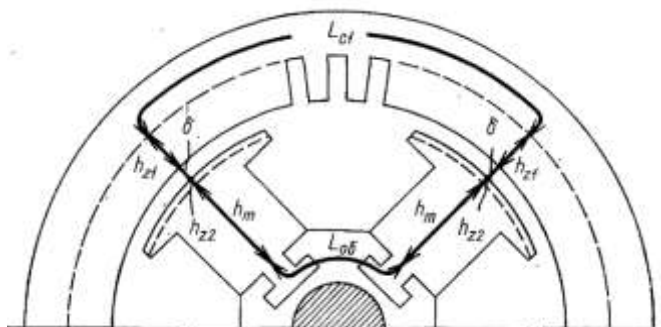


Рис. 3.4. - Магнітна лінія ЯСМ

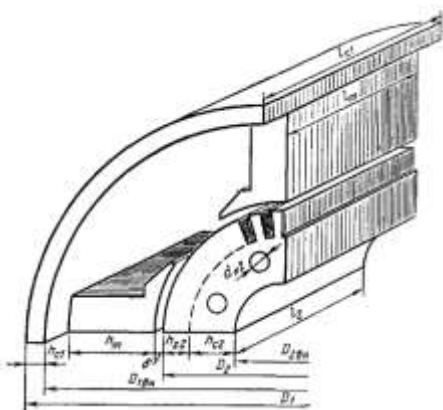


Рис. 3.5. - Аксонометрія МПС

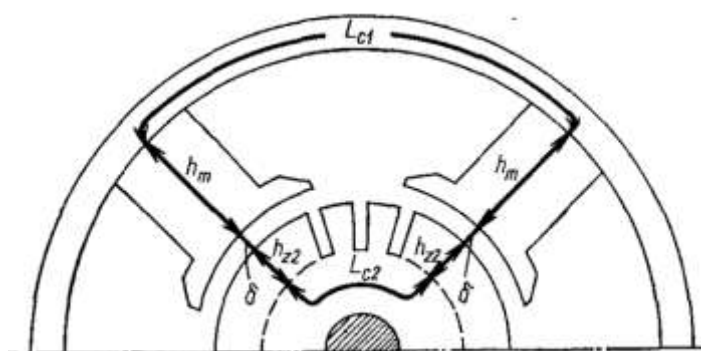


Рис. 3.6. - Магнітна лінія МПС

З рис. 3.2, рис. 3.4 і рис. 3.6 випливає, що в загальному випадку в електричних машинах можна виділити ділянки з постійними (або умовно постійними) напруженістю H_i і відповідним їм МРС (F_i):

- повітряного зазору, F_δ ;
- зубців статора, F_{z1} ;

- зубців ротора, F_{z2} ;
- ярма статора, F_{j1} ;
- ярма ротора, F_{j2} ;
- полюсів, F_m .

Сумарну МРС на пару полюсів складають як

$$\sum F = 2F_{z1} + 2F_{z2} + 2F_{\delta} + F_{j1} + F_{j2} + 2F_m. \quad (3.4)$$

За знайденою сумарною МРС визначають струм збудження або струм намагнічування, що і є метою розрахунку магнітного кола.

Для машин синхронних і постійного струму сумарна МРС на пару полюсів

$$\sum F = i_{\epsilon} \cdot W_{OB}. \quad (3.5)$$

де W_{OB} - число послідовних витків обмотки збудження на пару полюсів.

Задаючись рекомендованою величиною струму збудження, визначають необхідне число витків. За прийнятої густини струму обмотки збудження знаходять переріз провідника і здійснюють вибір розмірів і марки проводу обмотки.

В асинхронних машинах струм намагнічування дорівнює

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot \sum F}{0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_{об}}, \quad (3.6)$$

де p - число пар полюсів асинхронної машини; m - число фаз; W_1 і $K_{об}$ - відповідно послідовне число витків у фазі та обмотувальний коефіцієнт 1-ой гармоніки обмотки статора.

У разі асинхронної машини струм намагнічування є складовою номінального струму.

Визначення МРС окремих ділянок з урахуванням їх особливостей розглядається нижче.

Розрахунок втрат магнітного кола (або втрат у сталі) проведено в окремому розділі, хоча його теж можна віднести до розділу розрахунку магнітного кола електричних машин, як це роблять при проектуванні трансформаторів.

3.2. Розрахунок магніторухійної сили повітряного проміжку

Виходячи із загального вираження для МРС ділянки магнітного кола, для МРС повітряного проміжку можна записати

$$F_{\delta} = H_{\delta} \cdot l_{\delta}, \quad (3.7)$$

де H_{δ} - напруженість магнітного поля в повітряному проміжку, А/м; l_{δ} - довжина магнітної силової лінії в повітряному проміжку, м.

Далі необхідно конкретно визначити величини, які входять у (3.7).

Напруженість магнітного поля в повітряному проміжку

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0}, \quad (3.8)$$

де B_{δ} - максимальне значення індукції в повітряному проміжку, Тл;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнітна проникність повітря.

У загальному випадку величина індукції є розподілом густини магнітного потоку в повітряному проміжку по довжині полюсного поділку. Це дозволяє знайти величину основного потоку, як

$$\Phi = l_\delta \int_0^\tau B_{\delta x} \cdot dx, \quad (3.9)$$

де l_δ - розрахункова довжина магнітопроводу; $B_{\delta x}$ - індукція в точці x полюсного поділку.

Точне знаходження інтеграла (3.9) представляє труднощі через складність кривої розподілу індукції в повітряному проміжку вздовж полюсного поділку, тому інтеграл при практичних розрахунках замінюють рівністю

$$\int_0^\tau B_{\delta x} \cdot dx = B_\delta \cdot b_\delta, \quad (3.10)$$

де b_δ - частина полюсного поділку, яка дорівнює основі прямокутника, площа якого дорівнює площі інтегралу $\int_0^\tau B_{\delta x} dx$.

Для розуміння зробленої заміни наведені рис. 3.7 і рис. 3.8.

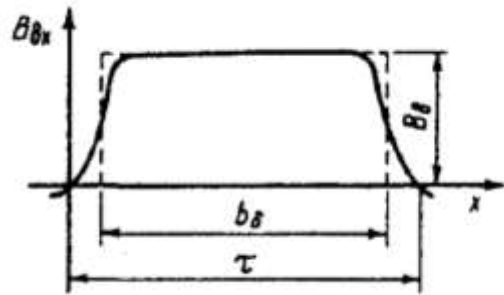
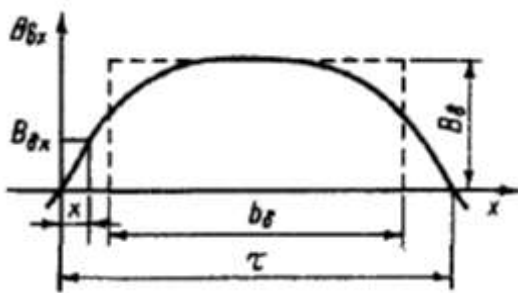


Рис. 3.7. - Розподіл індукції в проміжку з розподільними обмотками Рис. 3.8. - Розподіл індукції з явно вираженими полюсами

На рис. 3.7 наведено розподіл індукції в повітряному проміжку для машин з розподіленими обмотками, а на рис. 3.8 - для машин з явно вираженими полюсами (суцільні лінії). Штриховими лініями показано прямокутники з максимальної індукцією B_δ по висоті і з основою b_δ . При цьому площі реального розподілу індукції в повітряному проміжку і прямокутного рівновеликі. Ця побудова означає, що магнітний потік однаковий ($\Phi_\delta = \text{const}$) в обох випадках, і спрощує розрахунок реального магнітного потоку в повітряному проміжку.

Для спрощення визначення b_δ використовують рівність

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau, \quad (3.11)$$

де α_δ - коефіцієнт полюсного перекриття; τ - полюсна поділка, м.

Величина $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,64$ для синусоїдального розподілу індукції в повітряному проміжку по довжині полюсного поділку. При насиченні зубців крива розподілу індукції ущільнюється (рис. 3.7) і величина α_δ зростає: для середньо насичених ма-

шин $\alpha_\delta = 0,7..0,74$, а для сильно насичених може перевищувати 0,8.

Величина коефіцієнта полюсного перекриття α_δ для машин з явновираженими полюсами (рис. 3.8) залежить від геометричних розмірів полюсного наконечника і величини повітряного проміжку. Величину α_δ визначають при конкретному проектуванні машини, використовуючи рекомендації [1, 2].

Остаточно максимальну величину індукції в повітряному проміжку визначають з виразу

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta}, \quad (3.12)$$

Однак слід зазначити, що величина розрахункової довжини якоря (статора) l_δ залежить від конструкції магнітопроводу. Для електричних машин без радіальних каналів слід приймати величину l_δ , рівну реальній довжині магнітопроводу l_1 .

При наявності радіальних каналів розподіл індукції в повітряному проміжку B_δ нерівномірно по довжині (тобто в осьовому напрямку). На рис. 3.9 показано розподіл індукції по осьовій довжині повітряного проміжку.

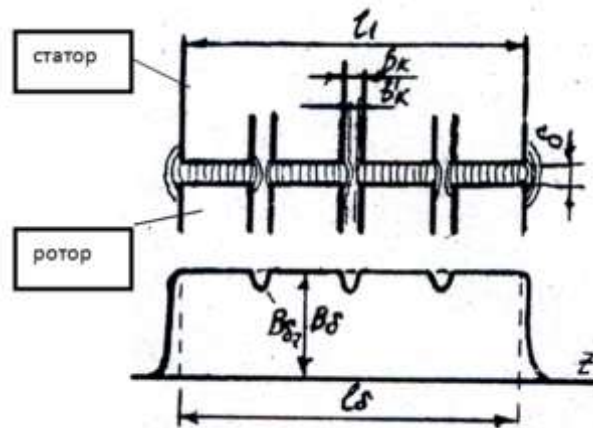


Рис. 3.9. – Розподіл індукції по вісі проміжку

У зоні радіальних каналів має місце зменшення величини B_δ , причому зміни величини індукції відбувається по кривій $B_{\delta z}$. У цьому випадку, зберігаючи величину B_δ постійної, вводять розрахункову довжину l_δ , яка дозволяє отримати площу $B_\delta l_\delta$ рівної площі реального розподілу індукції вздовж повітряного проміжку, тобто

$$B_\delta \cdot l_\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} B_{\delta z} \cdot dx. \quad (3.13)$$

Величину l_δ при наявності радіальних каналів визначають

$$l_\delta = l_1 - n_k - b_k^* + 2\delta, \quad (3.14)$$

де n - кількість радіальних каналів магнітопроводу; b_k^* - розрахункова ширина радіального каналу, яка залежить від співвідношення b_k / δ .

Знайдена величина l_δ по (3.14), дозволяє отримати уточнену індукцію в повітряному проміжку згідно (3.12).

Для гладких поверхонь статора і ротора (немає відкриття пазів) МРС повітряного зазору

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \cdot \delta. \quad (3.15)$$

Наявність відкриття пазів, заглибин для бандажів обмоток на роторі і інші нерівності приводять до збільшення середньої ефективної величини повітряного проміжку, що вимагає підвищення МРС для збереження постійним магнітного потоку (площі розподілу індукції). Найбільший вплив нерівномірності повітряного проміжку по довжині окружності статора і ротора надають відкриття пазів (шліци).

Для гладкого ротора і зубчастого статора на рис. 3.10 показаний розподіл силових магнітних ліній під зубцями і відповідна цьому крива розподілу B_{δ} у повітряному проміжку.

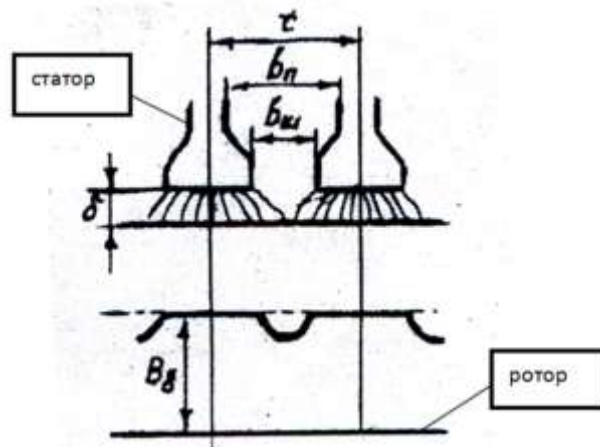


Рис. 3.10. – Розподіл магнітних ліній під зубцями

Очевидно, що для збереження величини магнітного потоку треба збільшувати F_{δ} , знайдене по (3.15). Необхідне збільшення отримують введенням ефективного повітряного проміжку

$$\delta' = \delta \cdot K_{\delta}, \quad (3.16)$$

де δ - величина повітряного проміжку при гладких поверхнях статора і ротора; K_{δ} - коефіцієнт Картера (або повітряного проміжку), що враховує середні зростання середньої ефективної довжини повітряного проміжку.

У загальному випадку, наявність зубчатості на статорі, враховуються величиною $K_{\delta 1}$, на роторі враховуються величиною $K_{\delta 2}$, а загальний - коефіцієнтом Картера, що входить в (3.16)

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}. \quad (3.17)$$

При відсутності зубчатості на одній з поверхонь коефіцієнт Картера для неї є рівним одиниці.

Для практичних розрахунків величину коефіцієнта Картера для напівзакритих пазів визначають за формулою

$$K_{\delta 1(2)} = \frac{t_{1(2)}}{t_{1(2)} - \gamma_{1(2)} \cdot \delta}, \quad (3.18)$$

де $\gamma_{1(2)} = \frac{b_{ш1(2)} / \delta}{5 + b_{ш1(2)} / \delta}$ - коефіцієнт, рекомендований експериментальними дослідженнями; $b_{ш1(2)}$ - ширина шліца на статорі (роторі).

Для відкритих і напіввідкритих пазів

$$K_{\delta 1(2)} = \frac{t_{1(2)} + 10 \cdot \delta}{b_{П1(2)} + 10 \cdot \delta}, \quad (3.19)$$

де $b_{П1(2)}$ - відкриття паза (шліц) відповідно з індексами для статора (1) і ротора (2).

Остаточно вираз для розрахунку МРС повітряного проміжку приймає вигляд

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot K_{\delta} = \frac{1}{\mu} \cdot B_{\delta} \cdot \delta. \quad (3.20)$$

Слід зазначити, що чисельна величина МРС повітряного проміжку F_{δ} , більше ніж МРС в інших ділянках магнітного кола машини.

3.3. Розрахунок магніторушійної сили зубців

Послідовність розрахунку МДС зубців залежить від поперечного перерізу зубців і ступеня їх насичення.

У загальному випадку розрізняють такі перерізи зубців:

- умовно постійне - зубець з паралельними сторонами (паз трапецеїдальний, грушоподібний або овальний; напівзакритий; для всипних обмоток);
- трапецеїдальної форми (паз прямокутний; обмотки жорсткі, стрижневі, короткозамкнені);
- складної форми (пази круглі, лопаткові, двокліткові і т.п.; обмотки всипні, короткозамкнені).

При розрахунку МДС зубців необхідно враховувати ступінь насичення:

- ненасичені (слабо насичені), якщо в будь-якому перерізі зубця індукція не вище 1,8 Тл для гарячекатаної сталі і не більше 1,9 Тл - для холоднокатаної сталі;
- сильно насичені, якщо в якомусь (навіть в одному) перерізі зубця індукція перевершує величину 1,8 Тл для гарячекатаної сталі, і 1,9 Тл - для холоднокатаної сталі.

У загальному випадку розрахунок МРС ведеться як для ненасичених, а якщо має місце насичення в будь-яких перерізах, то проводять уточнення. У зв'язку з цим нижче спочатку розглянуті зубці слабо насичені з різними поперечними перетинами.

3.3.1. Розрахунок МРС слабо насичених зубців

Розрізняють розрахунки МРС слабо насичених зубців трьох видів, враховуючи перетин зубців.

3.3.1.1. Розрахунок МРС зубців з паралельними сторонами.

До таких зубців відносять зубцеві зони з трапецеїдальними, овальними або грушоподібними пазами. Приклад грушоподібних пазів з ненасиченими зубцями показаний на рис. 3.11, де умовно приймають поперечний переріз по всій висоті зубця постійне.

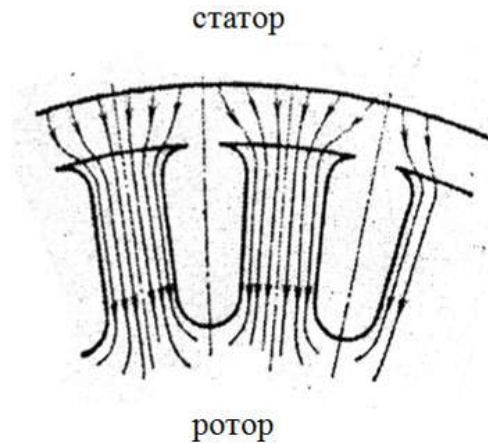


Рис. 3.11. – МРС зубців

Аналогічно вважають і для випадку трапецеїдального паза.

Ненасиченим зубець вважають тому, якщо усі силові лінії магнітного потоку повітряного проміжку на зубцевому кроці входять у сталь зубця (тобто $B_z \leq 1,8$ Тл для гарячекатаної сталей і $B_z \leq 1,9$ Тл для холоднокатаний) для будь-якого перерізу. Це означає, що напруженість H_z по всій висоті зубця залишається постійною. Тоді МРС зубця, згідно з загальним висловом МРС для ділянки магнітного ланцюга, дорівнює

$$F_z = H_z \cdot L_z, \quad (3.21)$$

де $L_z = h_{II}$ - висота зубця (або паза); H_z - напруженість на одиницю довжини, що є функцією від B_z і визначається по кривій намагнічування для зубців прийнятої марки електротехнічної сталі, $B_z = f(H_z)$.

Величина індукції в зубцях з постійним перерізом (сторони зубця паралельні) дорівнює

$$B_{z1(2)} = B_\delta \cdot \frac{t_{1(2)}}{b_{z1(2)} \cdot K_c}, \quad (3.22)$$

де B_δ - уточнена величина індукції в повітряному проміжку при розрахунку обмоток якоря; $t_{1(2)}$ - зубцевий крок відповідно статора (1) і ротора (2); $b_{z1(2)}$ - ширина зубця (між паралельними сторонами зубця) яку, приймають постійною відповідно для статора (1) і ротора (2); $K_c = 0,93..0,97$ - коефіцієнт заповнення сталлю пакета магнітопроводу.

Формула (3.22) передбачає відсутність радіальних каналів в магнітопроводах.

Використовуючи вираз (3.22) визначають величину B_z , далі знаходять напруженість по кривій намагнічування сталі для зубців, $H_z = f(B_z)$. Знайдене значення

H_z підставляють у (3.21) і розраховують МРС одного зубця.

3.3.1.2. Розрахунок МРС трапецеїдальних зубців.

Трапецеїдальна форма зубця має місце при прямокутному пазу (обмотки жорсткі, стрижневі, короткозамкнені). На рис. 3.12 показаний трапецеїдальний паз в ненасиченому стані.

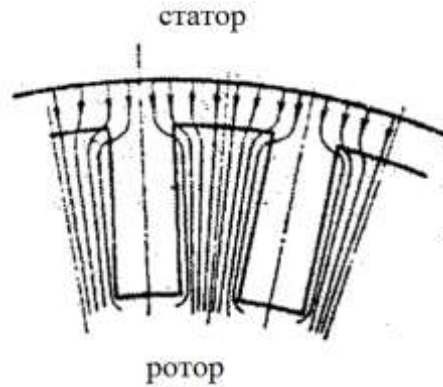


Рис. 3.12.

Очевидно, що магнітний потік на зубцевому кроці Φ_t завжди дорівнює потоку в будь-якому x -му перерізі зубця. А це означає, що величина індукції B_x у різних перерізах непостійна, є величина змінна, бо переріз зубця змінний.

Враховуючи лінійний характер зміни перетину зубця (рис. 3.13а), то і B_x щодо висоти паза h_{Π} змінюється лінійно. Це видно на рис. 3.13б. Через нелінійність кривої намагнічування сталі зубців $H_z = f(B_z)$ зміна напруженості H_{zx} по висоті зубця h_{zx} , тобто $H_{zx} = f(h_{zx})$, носить нелінійний характер рис. 3.13в).

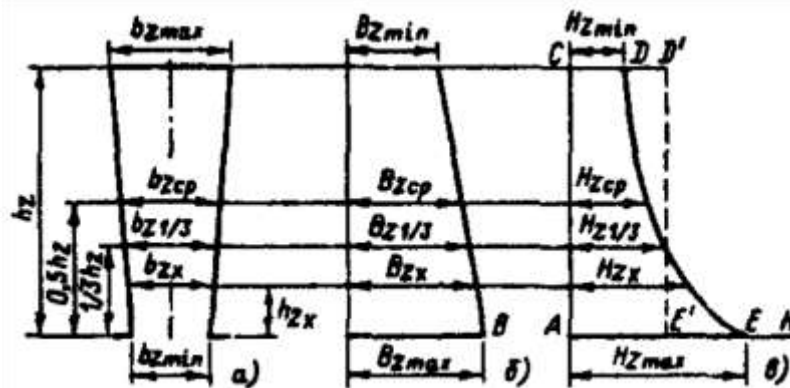


Рис. 3.13.

Сумарна МРС зубця представляє суму

$$\sum \Delta F_{zx} = \sum H_x \cdot \Delta h_x, \quad (3.23)$$

де H_x напруженість на Δh_x ділянці по висоті зубця.

По суті $H_x \cdot \Delta h_x$ - це площа, яка дорівнює МРС ΔF_{zx} , а значить уся площа фігури AODE є величиною МДС зубця F_z .

Спрощення розрахунку дає застосування такої середньої і постійної напруженості по висоті паза H_{zcp} , при якій добуток $H_{zcp} \cdot h_z$ дає площу рівну площі реаль-

ної МРС, тобто фігурі АОДЕ.

Знаходження H_{zcp} здійснюють двома способами:

- за формулою Сімпсона;
- через величину індукції на 1/3 висоти зубця від вузької частини.

Щоб скористатися формулою Сімпсона необхідно знайти величини індукції в трьох перетинах: найменшому $B_{z_{max}}$, середньому $B_{z_{cp}}$ і найбільшому $B_{z_{min}}$. Для кожної з цих індукцій по кривій намагнічування сталі для зубців знаходять $H_{zm_{max}}$, $H_{z_{срeс}}$ і $H_{zm_{mi}}$. Потім за формулою Сімпсона знаходять

$$H_{zcc} = \frac{H_{zm_{max}} + 4H_{z_{срeс}} + H_{zm_{mi}}}{6}, \quad (3.24)$$

величина якій відповідає основі ОЕ прямокутника АОДЕ, площа якої відповідає площі складної фігури АОДЕ, тобто реальної МРС зубця.

Отже, в цьому випадку МРС зубця одного

$$F_z = H_{zcp} \cdot h_z. \quad (3.25)$$

Другий спосіб впливає з розгляду рис. 3.13в, де H_{zcp} приблизно відповідає H_{zx} на 1/3 висоти зубця. Враховуючи це, знаходять індукцію на 1/3 висоти зубця від найменшого перерізу $B_{z_{1/3}}$, потім по кривій намагнічування сталі для зубців визначають напруженість $H_{z_{1/3}}$, яку приймають як середню напруженість H_{zcp} . Використовуючи вираз (3.24), знаходять МРС зубця з трапецеїдальним перетином

$$F_z = H_{z_{1/3}} \cdot h_{II}. \quad (3.26)$$

3.3.1.3. Розрахунок МРС зубців зі складною формою перетину.

Складний переріз зубця мають машини з круглими, лопатковими, двоклітковими і т.п. пазами.

Для розрахунку МРС таких ненасичених зубців їх по висоті розбивають на i ділянок. Для прикладу на рис. 3.14а наведено переріз зубця ротора з круглим пазом.

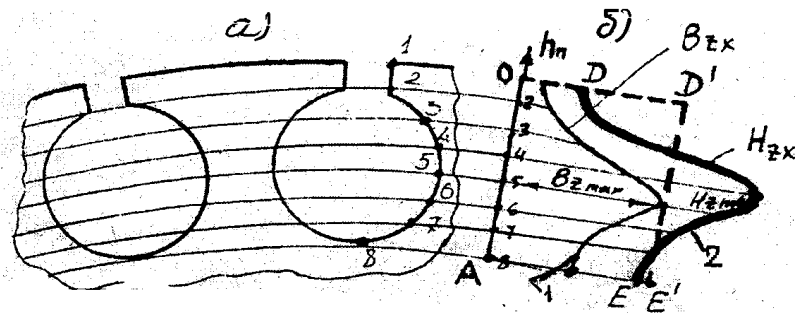


Рис. 3.14.

Його по висоті розбито на $i=8$ ділянок зі змінною шириною b_{z2i} . Використовуючи вираз

$$B_{z2i} = B_{\delta} \cdot \frac{t_2}{b_{z2i} \cdot K_c}. \quad (3.27)$$

знаходять величину індукції у перерізі кожної ділянки.

В (3.27) входять: B_{δ} - величина індукції в повітряному зазорі; t_2 - зубцевий крок ротора по поверхні; b_{z2i} - ширина зубця в і-тому перерізі; K_c - коефіцієнт заповнення сталі.

За знайденим значенням B_{z2i} на рис. 3.14б наведена крива 1, яка характеризує якісний розподіл індукції B_{z2i} відносно висоти зубця. Ця крива має складний вид.

Далі для кожного перетину з індукцією B_{z2i} визначають напруженість H_{z2i} з кривих намагнічування для зубців сталі тип якої використовують при проектуванні. За відомим H_{z2i} будується залежність зміни напруженості по висоті паза (крива 2, рис. 3.14б). За рахунок нелінійності кривої намагнічування ця крива не пропорційна кривій індукції 1.

Подальший хід визначення МРС зубця складається в заміні площі кривої AODE рівновеликої площею прямокутника AODE з основою AE.

Величину основи прямокутника AE вважають рівної середньої напруженості H_{z2cp} , що дозволяє використовувати формулу (3.24) і знайти МРС слабо насиченого зубця складного перерізу при круглих пазах.

Подібним чином діють для будь-якого за складністю перетину зубця.

3.3.2. Розрахунок МРС сильно насичених зубців

При величині індукції в будь-якому перетині зубця більше 1,8 Тл для гарячекатаної сталі і 1,9 Тл для холоднокатаної, зубець вважають сильно насиченим. Перевищення меж вказаних величин індукції потребує нового підходу.

Це обумовлено тим, що при таких індукціях має місце відхилення в паз частини магнітного потоку повітряного проміжку із-за зближення величин опорів насиченої сталі і пазових ділянок, магнітна проникність останнього складає $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

На рис. 3.15 показана якісна картина розподілу магнітних силових ліній магнітного поля в разі сильно насиченого зубця на зубцевому кроці.

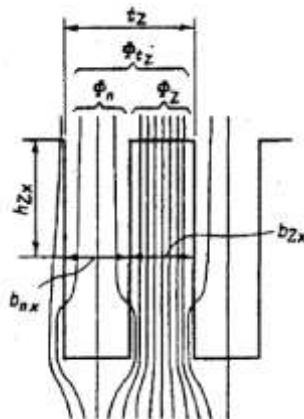


Рис. 3.15.

З рис. 3.15 випливає, що потік повітряного проміжку на зубцевому кроці Φ_t в будь-якому перерізі зубця і паза дорівнює сумі магнітних потоків у зубці Φ_{zx} і у па-
зу Φ_{nx} , тобто

$$\Phi_t = \Phi_{zx} + \Phi_{nx}. \quad (3.28)$$

У рівнянні (3.28) розділимо обидві частини рівності на площу зубця в перерізі x , одночасно помножимо і розділимо потік у пази в x -тому перерізі Φ_{nx} на площини S_{nx} в тому ж перерізі. В результаті отримають

$$\frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{\Phi_{zx}}{S_{zx}} + \frac{\Phi_{nx} \cdot S_{nx}}{S_{zx} \cdot S_{nx}}. \quad (3.29)$$

З (3.29) очевидна рівняння

$$B_{zx}^* = B_{zx} + B_{nx} \cdot \frac{S_{nx}}{S_{zx}}, \quad (3.30)$$

де B_{nx}^* - індукція за умови, що насичення відсутнє і у весь магнітний потік повітряного проміжку на зубцевому кроці йде в зубець, тобто відхилення потоку в паз відсутній; цю індукцію називають розрахунковою; $B_{zx} = \Phi_{zx} / S_{zx}$ - реальна індукція в перерізі зубця S_{zx} з урахуванням відхилення потоку в паз; $B_{nx} = \Phi_{nx} / S_{nx}$ - реальна індукція в перерізі паза S_{nx} .

Враховуючи що паз, заповнений ізоляцією і міддю обмоток, має магнітну проникність μ_0 , то справедливе рівняння

$$B_{nx} = \mu_0 \cdot H_{nx}, \quad (3.31)$$

тобто між величиною індукції і величиною напруженості у пази лінійна залежність.

Далі приймають допущення, що екіпотенціальна лінії напруженості у зубці і пази знаходяться на одній і тій ж висоті, $h_{nx} = h_{zx}$, тобто однакові. Це допущення дозволяє записати рівність

$$H_{zx} = H_{nx}. \quad (3.32)$$

З урахуванням виразів (3.31) і (3.32) вираз (3.30) прийме вигляд

$$B_{zx}^* = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} \frac{S_{nx}}{S_{zx}}, \quad (3.33)$$

чи

$$B_{zx}^* = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} K_{nx}, \quad (3.34)$$

де $K_{nx} = \frac{S_{nx}}{S_{zx}}$ - коефіцієнт, що дорівнює відношенню площі паза до площі зубця в x -тому перерізі (на висоті $h_{nx} = h_{zx}$).

Для визначення величини коефіцієнта K_{nx} використовують вираз

$$K_{nx} = \frac{S_{nx}}{S_{zx}} = \frac{b_{nx} \cdot l_{\delta}}{b_{zx} \cdot l_{CT} \cdot K_c}, \quad (3.35)$$

де l_{CT} - довжина пакетів сталі магнітопроводу (з урахуванням між листової ізоляції) при наявності радіальних каналів.

При відсутності радіальних каналів $l_{\delta} = l_{CT}$ і вираз спрощують

$$K_{nx} = \frac{b_{nx}}{b_{zx} \cdot K_c}, \quad (3.36)$$

який лежить в межах $K_{nx} = 0,2..5,0$ в машинах нормального виконання.

З урахуванням вищевикладеного послідовності розрахунку МРС зубців така:

1 Висоту зубця розбивають на x ділянок.

2 У кожному x -тому перерізі знаходиться B'_{zx} (тобто розрахункову, коли весь потік йде через зубець).

3 Якщо величина B'_{zx} не перевершує 1,8 Тл для гарячекатаної сталі зубців або 1,9 Тл для холоднокатаної сталі, то B'_{zx} вважають рівною реальної B_{zx} і по ній знаходять напруженість H_{zx} , використовуючи криву намагнічування прийнятої сталі для зубців. Знайдена величина H_{nx} відкладається у відповідній точці.

4 Якщо у якомусь перерізі величина B'_{nx} відповідає насиченому стану зубця, то в цьому випадку визначають реальну величину H_{zx} , вирішуючи рівняння (3.34) для конкретного перерізу на ділянці x у наступній послідовності:

4.1 будують криву намагнічування сталі для зубців (крива 1, рис. 3.16).

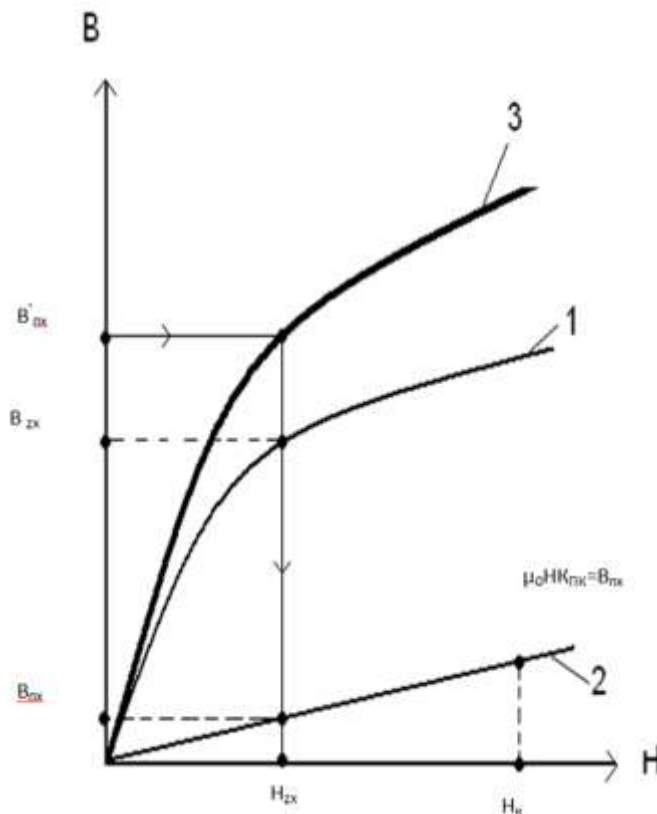


Рис. 3.16.

4.2 для даного перерізу визначають величину K_{nx} по (3.35) або (3.36) і буду-

ють лінійну характеристику $B_{nx} = \mu_0 H_{nx} K_{nx}$ (крива 2, рис. 3.16), величиною H_{nx} задаються будь-якою, але вона лежить в межах вибраного масштабу для побудованої кривої намагнічування 1, у цьому ж масштабі проводять лінію $B_{nx} = f(\mu_0 H_{nx} K_{nx})$,

4.3 Проводять графічне складання кривих 1 і 2, отримуючи криву 3, яка відповідає рівнянню (3.34).

4.4 За розрахованої величиною B'_{nx} з використанням кривої 3 знаходять реальну величину H_{zx} в перерізі x .

4.5 Знайдене чисельне значення H_{zx} відкладають на висоті h_{zx} для побудови залежності $h_z = f(H_{zx})$.

4.6 Аналогічним чином поступають і для всіх наступних перерізів, якщо зубець у них насичений.

4.7 Побудувавши повну криву зміни H_{zx} по висоті паза, знаходять H_{zcp} , величина якої є основою рівновеликого по площі прямокутника. Цю побудову називають графічним інтегруванням.

У посібниках з проектування окрім таблиць, кривих намагнічування для ненасичених зубців наводять графічні залежності цих кривих з урахуванням величин коефіцієнта K_{nx} . В цьому випадку не потрібно побудову рис. 3.16. Необхідно знати лише величини B'_{nx} і K_{nx} , а за відповідними K_{nx} кривими знайти величину H_{zx} .

При використанні цих кривих відпадає потреба у побудовах залежностей подібних рис. 3.16.

Знайдена графічним інтегруванням дозволяє визначити МРС зубця, використовуючи вираз (3.25).

Слід зазначити, що визначення насичення проводять для будь-яких форм перетину зубців.

3.4. Розрахунок магніторушійних сил ярем

Ярма магнітного кола електричних машин виконують допоміжну функцію маючи відносно невеликий магнітний опір, сприяють замиканню і концентрації основного потоку у зоні перетворення енергії: зубцевій зоні якірної обмотки та повітряного проміжку

Конструктивно ярма можна поділити на два види:

- прилегли до явновиражених полюсів (явнополюсні синхронні машини і класична конструкція машин постійного струму);

- прилегли безпосередньо до неявновиражених полюсів, або до зубцевої зони якоря або ротора.

3.4.1. МРС ярем, прилеглих до явновиражених полюсів

До таких ярем відноситься станина машини постійного струму і ярмо ротора, до яких кріпляться явновиражені полюса. На рис. 3.17 показане магнітне коло машини постійного, за довжину ярма приймають середню лінію L_c .

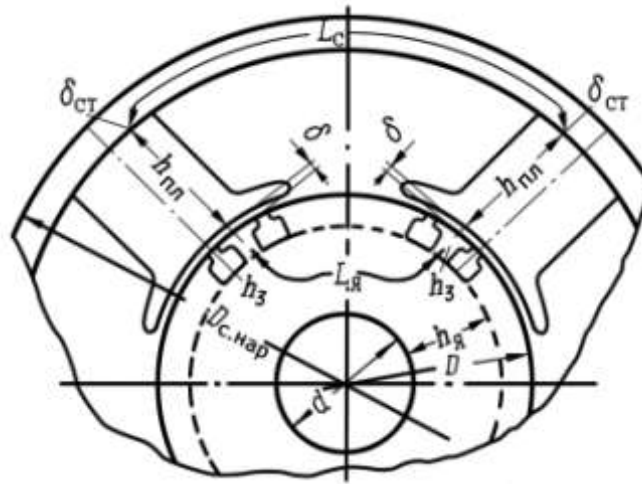


Рис. 3.17. – Магнітне коло

Враховуючи, що явнополюсна машина являє звернену конструкцію магнітного кола машини постійного струму, то в ній L_c - середня лінія ярма ротора.

При розрахунку МРС таких ярем припускають рівномірний розподіл індукції по довжині середньої лінії на полюс L_c , тобто величина індукції в ярмі вважають постійною.

Величина магнітного потоку в ярмі Φ_a дорівнює півсумі основного потоку Φ і потоку розсіювання між плюсами і ярмом

$$\Phi_a = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2}, \quad (3.37)$$

де $\Phi_\sigma = \sigma \cdot \Phi$ - величина потоку розсіювання; $\sigma = 0,15 \dots 0,25$ - коефіцієнт розсіювання, який приймають в зазначених межах для машин нормального виконання.

З урахуванням (3.37) величина індукції в ярмі

$$B_a = \frac{\Phi(1 + \sigma)}{2 \cdot h_a \cdot L_a}, \quad (3.38)$$

де h_a - висота ярма; L_a - довжина чистого заліза ярма в осьовому напрямку.

За знайденою величиною індукції B_a та кривій намагнічування сталі для ярма, $B_a = f(H)$, визначають величину напруженості H_a , а потім і МРС ярма як

$$F_a = H_a \cdot L_c, \quad (3.39)$$

де L_c - середня довжина дуги ярма на полюс.

3.4.2. МРС ярем, прилеглих до неявновиражених полюсів

Прикладом таких ярем є ярма статора асинхронних і синхронних машин, ротора асинхронної машини, а також ярмо якоря (ротора) машини постійного струму.

На рис. 3.18 показано магнітне коло на $1/2p$ частини асинхронної машини.

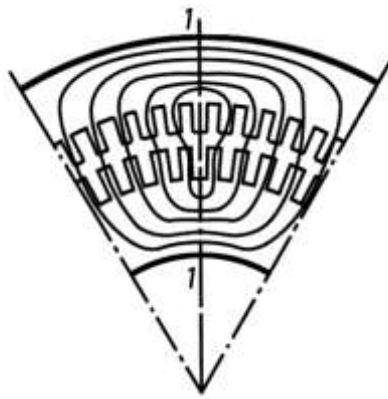


Рис. 3.18. - Магнітне коло

Характерною особливістю розглянутого типу ярем є нерівномірний розподіл магнітних силових ліній магнітного потоку по висоті і середній довжині ярма. Звідки випливає, що уздовж ярма неоднакова індукція, а значить і напруженість. Виникаючи в цьому випадку труднощі, визначення МРС ярма можна вирішити двома способами, вважаючи що повний магнітний потік у ярмі дорівнює половині основного потоку, тобто $\Phi_a = \Phi / 2$, а потоки розсіяння відсутні.

У першому способі вважають, що розподіл магнітного потоку вздовж ярма рівномірний, тоді індукція в ньому відповідає найбільшому значенню при реальному розподілі і дорівнює

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot L_a}, \quad (3.40)$$

де Φ - основний магнітний потік в ярмі; h_a - висота ярма; L_a - довжина чистого заліза ярма в осьовому напрямку.

Далі за спеціальною кривою намагнічування для ярем визначають напруженість H_a для розрахункової індукції B_a . Тут слід зазначити, що сама залежність кривої намагнічування сталі ярма враховує нерівномірність розподілу індукції по висоті і довжині середньої лінії ярма.

У цьому випадку МРС ярма визначають за виразом (3.39).

У другому способі по B_a виразу (3.40) знаходять напруженість H_a по основній кривій намагнічування сталі, але зазначену нерівномірність розподілу індукції враховують коефіцієнтом ξ , залежність якого від величини індукції B_a визначеною згідно виразу (3.40) подана на рис. 3.19.

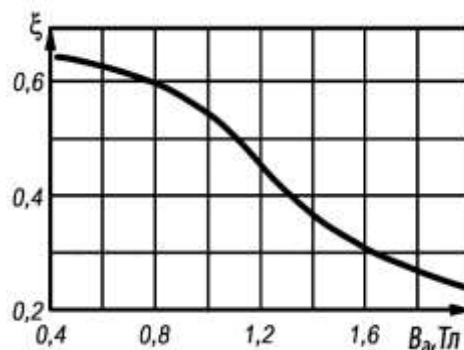


Рис. 3.19. – Коефіцієнт ξ

МРС ярма у другому випадку визначають виразом

$$F_a = \xi \cdot H_a \cdot L_c. \quad (3.41)$$

3.5. Розрахунок магніторушійних сил явновиражених полюсів

Для машин постійного струму, магнітне коло яке наведено на рис. 3.17, розрахунок МРС полюса порівняно простий.

Його починають з визначення величини індукції у полюсі

$$B_m = \frac{\Phi_m}{b_m \cdot L_m \cdot K_c}; \quad (3.42)$$

де $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$ - магнітний потік полюса, що представляє суму основного потоку Φ і потоку розсіювання $\Phi_\sigma = \Phi \cdot \sigma$; $\sigma = 0,15 \dots 0,25$ - коефіцієнт, що враховує потоки розсіювання; b_m - ширина полюса; L_m - осьова довжина полюса; K_c - коефіцієнт заповнення сталлю шихтованого полюса.

За відомою величиною B_m знаходять відповідну напруженість H_m по кривій намагнічування сталі полюсу. Розраховують МРС полюса

$$F_m = H_m \cdot h_m, \quad (3.43)$$

де h_m - висота полюса.

Для синхронних машин розрахунок МРС полюса ускладнюється, оскільки потік розсіювання Φ_σ розраховують. Це обумовлено необхідністю створення більшої МРС полюса в порівнянні з машинами постійного струму. Магнітне коло явнополюсної синхронної машини наведено на рис. 3.20, де показані основний потік і шляхи замикання потоків розсіювання.

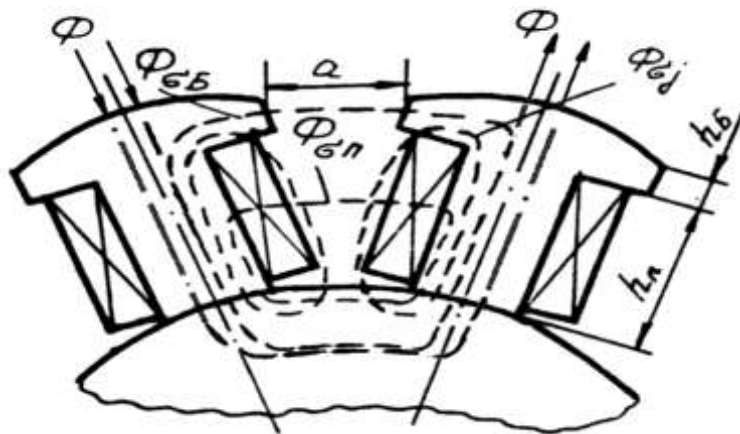


Рис. 3.20.

Очевидно, що повний потік полюса

$$\Phi_m = \Phi + \Sigma \Phi_{\sigma i} \quad (3.44)$$

обумовлює величину індукції і полюсі B_m , якій відповідає напруженість H_m і МРС полюса F_m .

Сумарний потік розсіювання $\Sigma \Phi_{\sigma i}$ знаходять як суму потоків розсіювання:

$\Phi_{\sigma\delta}$ - між полюсними наконечниками (башмаками);

$\Phi_{\sigma j}$ - між полюсним наконечником і ярмом ротора;

$\Phi_{\sigma m}$ - між полюсами. Середні силові лінії цих потоків розсіювання показані на рис. 3.20.

Розрахунок МРС полюса проводять у кілька етапів. На першому етапі використовують величину магнітного потоку полюса який дорівнює основному Φ . Це дозволяє знайти МРС F_{m0} полюса без його урахування полів розсіювання. Для цього за величиною основного потоку Φ визначають індукцію полюса

$$B_{m0} = \frac{\Phi}{b_m \cdot L_m \cdot K_c}, \quad (3.45)$$

де b_m - ширина полюса; L_m - довжина полюса; K_c - коефіцієнт заповнення стали полюса.

Використовуючи величину B_{m0} , визначають за кривою намагнічування питому напруженість для сталі полюса H_{m0} і відповідну МРС полюса

$$F_{m0} = H_{m0} \cdot h_m; \quad (3.46)$$

де h_m - висота полюса.

Для розрахованої МРС полюса F_{m0} проводять розрахунок полів розсіювання, прийнятих згідно рис. 3.20.

Величина МРС F_{m0} дозволяє визначити відповідні їй складові потоків розсіювання. Далі по (3.44) уточнити Φ_m і відповідну йому індукцію B_m по (3.45), потім H_m і уточнити F_m . Якщо уточнена $F_m > F_{m0}$ за 5%, то цикл повторюють, вважаючи первісну МРС F_m . Якщо при розбіжності між попередньою заданою МРС і уточненою не перевищує 5%, тоді уточнену величину МРС полюса приймають як остаточну.

Обчислення потоків розсіювання здійснюють виразом згідно закону Ома для магнітного кола

$$\Phi_{\sigma i} = \frac{F_{m0}}{R_{\mu\sigma i}} = \lambda_{\mu\sigma i} \cdot F_{m0}; \quad (3.47)$$

де $R_{\mu\sigma i}$ і $\lambda_{\mu\sigma i}$ - відповідно магнітний опір і магнітна провідність по i -тому шляху розсіювання; F_{m0} - початкове значення МРС полюса.

Магнітну провідність по i -тому шляху розсіювання визначають, нехтуючи магнітними провідностями сталі. Тоді магнітна провідність i -тому шляху розсіювання визначається магнітною проникністю повітря $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, середньою довжиною магнітної силової в повітряному проміжку i -тої ділянки та його перерізом.

Наприклад, магнітну провідність для потоку розсіювання між полюсними наконечниками (згідно рис. 3.20) визначають

$$\lambda_{\sigma\delta} = \frac{\mu_0 \cdot h_B \cdot l_m}{a}, \quad (3.48)$$

де h_B - висота полюсного наконечника; l_m - осьова довжина полюса; a - середня відс-

тань між полюсним наконечником.

Для магнітної провідності між полюсом і ярмом (рис. 3.20)

$$\lambda_{\sigma j} = \mu_0 a_{\text{ПК}} \cdot l_m / h_n, \quad (3.49)$$

де $a_{\text{ПК}}$ - довжина виступу (кромки) полюсного наконечника; l_m - осьова довжина полюса; h_n - середня висота від кромки полюса до ярма.

Аналогічно для магнітної провідності потоку розсіювання між полюсами

$$\lambda_{\sigma m} = \mu_0 \cdot h_n \cdot l_m / a_{\text{мсс}}, \quad (3.50)$$

де h_n - середня висота від кромки полюса до ярма; l_m - осьова довжина полюса; $a_{\text{мсс}}$ - середня відстань між полюсами.

Використовуючи попередню величину МРС і розраховані магнітні провідності (3.48), (3.49), (3.50), визначають величини потоків $\Phi_{\sigma b}$, $2\Phi_{\sigma j}$ і $\Phi_{\sigma m}$.

Величини потоків розсіювання підсумовують з основним по (3.44). Далі по (3.45) знаходять уточнену індукцію полюса B_m , а по кривій намагнічування сталі для полюсів визначають уточнену напруженість в полюсі H_m , і по (3.46) уточнену величину МРС полюса F_m .

При розбіжності між первісною прийнятої МРС і уточненої не більше 5%, процес розрахунку урахування впливу потоків розсіювання на МРС полюсів, а значить і на сумарну МРС машини вважають закінченим.

3.6. Сумарна МРС машини на пару полюсів. крива намагнічування

Розраховані величини МРС окремих ділянок уздовж магнітної силової лінії основного потоку машини складаються, отримуючи в загальному випадку МРС на пару полюсів

$$\Sigma F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_j + F_a + l \cdot F_m \quad (3.51)$$

де всі складові визначені для номінального значення ЕРС обмотки якоря.

Сумарна МРС ΣF дозволяє визначити струм збудження синхронних і машин постійного струму або струм намагнічування асинхронних машин (струм неробочого ходу при номінальній напрузі).

Ці значення струму використовують для розрахунку параметрів кола намагнічування і робочих характеристик.

Для машин постійного струму і синхронних проводять додаткові розрахунки, задаючись значеннями ЕРС обмотки якоря - 0.5, 0.75, 1.0, 1.1, 1.2 номінальної ЕРС. У результаті отримують залежність $\Sigma F = f(E_1)$, яку зображують графічно і використовують для розрахунку робочих характеристик.

Залежність $\Sigma F = f(E_1)$ називають кривою намагнічування або характеристикою неробочого ходу. Ця крива по суті є залежностями $E_1, \Phi_1, B_{\delta} = f(\Sigma F, I_{\delta}, I_{\mu})$.

На рис. 3.21 показана типова характеристика намагнічування або неробочого ходу, на якій виділяють три ділянки.

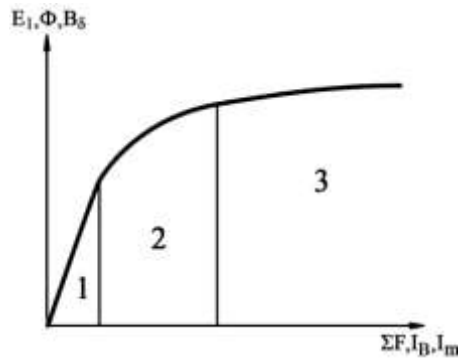


Рис. 3.21.

Ділянка 1 (прямолінійний) відповідає ненасиченої магнітної системі машини, ділянка 2 (або коліно насичення) - середньому насиченню, і ділянка 3 - сильному насиченню.

В електричних машинах загального призначення робоча точка (тобто відповідна номінальної ЕРС, потоку та індукції) розташовується на коліні насичення. В залежності від призначення та вимог до спеціальних машин їх проектують з ненасиченим або сильно насиченим станом магнітного кола.

Експериментально отримана характеристика неробочого ходу служить реальною оцінкою стану магнітного кола при номінальній напрузі: ступінь насичення, реальний коефіцієнт насичення, збіг розрахункового і виконаного в машині ефективного повітряного проміжку.

Крива характеристики неробочого ходу (рис. 3.22) дозволяє визначити співвідношення МРС повітряного проміжку F_δ і сталі магнітопроводу $F_{ст}$, тобто визначити реальний коефіцієнт насичення магнітопроводу і порівняти з розрахунковим.

$$K_{нас} = \frac{F_\delta + F_{ст}}{F_{ст}} \quad (3.52)$$

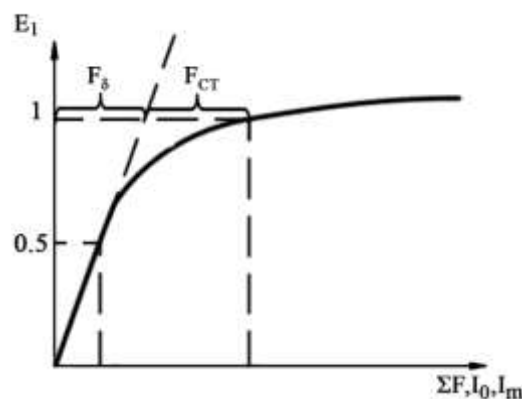


Рис. 3.22. – Характеристика намагнічування

Точка характеристики неробочого ходу, відповідна номінальній струму намагнічування, дозволить для асинхронних машин розрахувати величину індуктивного опору

$$X_m = \frac{E_1}{I_\mu} \text{ Ом}; \quad (3.53)$$

або у відносних одиницях

$$X_m^* = \frac{1}{I_\mu^*}; o.e. \quad (3.54)$$

де I_μ^* - відносна величина струму НХ в асинхронних машинах.

Величину X_m^* використовують у схемі заміщення асинхронної машини.

Крива неробочого ходу дозволяє оцінити величину ефективного повітряного проміжку. На рис. 3.23 показані три криві намагнічування. Якщо у кривій 1 збігаються лінійні частини ненасичені дослідної та розрахункової кривих намагнічування, то це вказує на повне співпадіння ефективних повітряних проміжків, а значить і МРС проміжків.

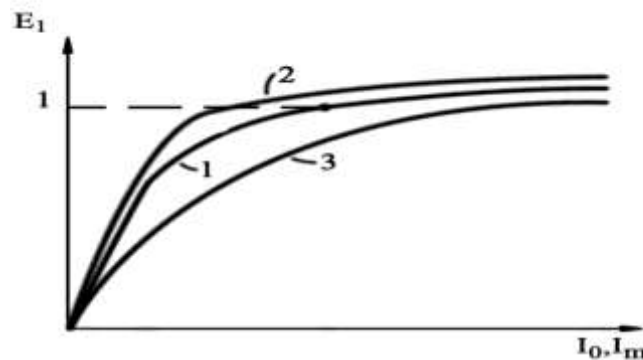


Рис. 3.23. – Криві намагнічування

Крива 2 свідчить про зменшення повітряного проміжку машини δ_2 в порівнянні з кривою 1 (δ_1). У разі кривій 3 протилежний випадок: повітряний проміжок $\delta_3 > \delta_1$.

Слід зазначити, що зменшені повітряні проміжки в машинах постійного струму і синхронних небажані, оскільки посилюється розмагнічувальна дія реакції якоря, що вимагає збільшення струмів (а значить і потужності) обмоток збудження.

Враховуючи, що в синхронних машинах

$$M = \frac{mE_f U_1}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (3.55)$$

то при проектуванні рекомендують вибір величини повітряного проміжку, щоб $x_d \sim \frac{1}{\delta}$ не було надмірно велике.

Опорний конспект

Послідовність викладених розрахунків щодо визначення величин МРС окремих ділянок магнітного кола і сумарною МРС на пару полюсів, струму збудження або намагнічування, а також побудова характеристики неробочого ходу показані у вигляді опорного конспекту на рис. 3.24. Це сприяє запам'ятовуванню, вивченню та розумінню розділу розрахунку магнітного кола.

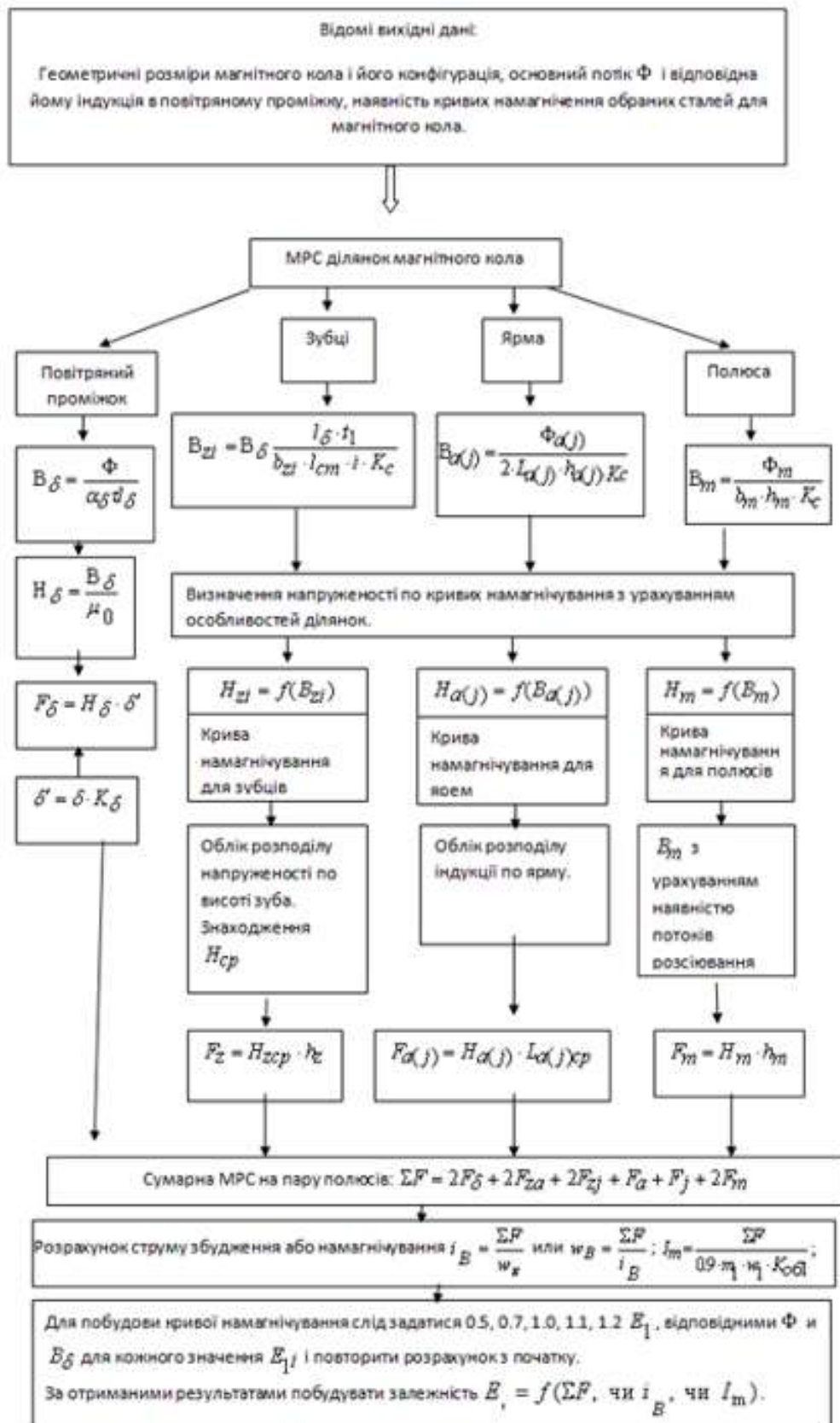


Рис. 3.24.

РОЗДІЛ № 4. РОЗРАХУНОК ВТРАТ У СТАЛІ

Під втратами в сталі розуміють втрати, обумовлені магнітними змінними потоками. Розрізняють втрати:

- основні;
- додаткові.

4.1. Розрахунок основних втрат

Основні втрати виникають в магнітопроводі машини від основного потоку, який бере участь в перетворенні енергії.

Основні втрати є сумою:

- втрат на гістерезис;
- втрат на вихрові струми.

4.1.1. Втрати на гістерезис

Ці втрати викликані перемагнічуванням електротехнічної сталі магнітопроводу основним магнітним потоком. Іноді ці втрати пояснюють втратами енергії на зміни орієнтації елементарних магнітиків сталі (доменів).

Використана енергія (або втрати на гістерезис) визначається площею петлі гістерезису (рис. 4.1),

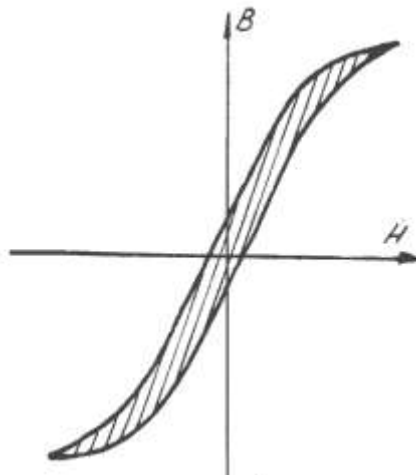


Рис. 4.1. – Петля гістерезису

а величина її

$$W = \oint H dB. \quad (4.1)$$

Очевидно, що для зменшення втрат на гістерезис необхідно використовувати електротехнічні сталі з вузькою петлею гістерезису (магнітом'які), які і застосовують в електричних машинах. Сталі з широкою петлею гістерезису (магнітотверді) використовують у спеціальних машинах і машинах з постійними магнітами.

На практиці користуються величиною питомих втрат, вимірюваних як Вт/кг. Ця величина питомих втрат на гістерезис залежить від товщини листа електротехні-

чної сталі магнітопроводу машини (рис. 4.2) і характеру переманічуючого поля (рис.4.3), яке може бути пульсуючим (в зубцях) крива 1 або обертовим (в ярмах) крива 2.

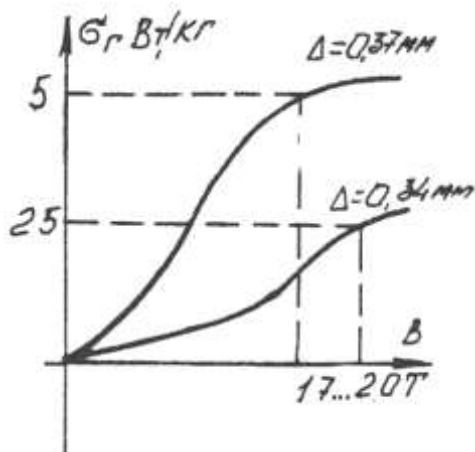


Рис. 4.2. - Питомі втрати від товщини

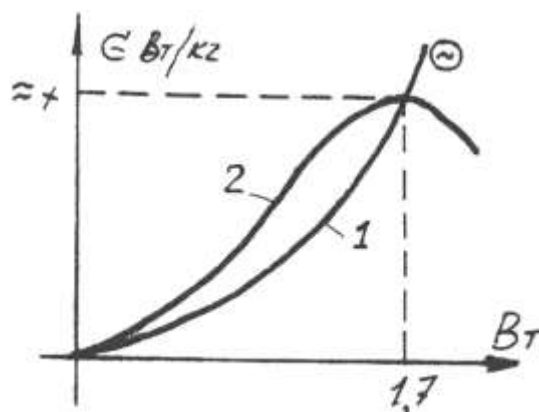


Рис. 4.3. - Питомі втрати від поля

У разі застосування підмагнічування магнітного кола за допомогою обмотки, що живиться постійним струмом, крива намагнічування може приймати вид рис. 4.4.

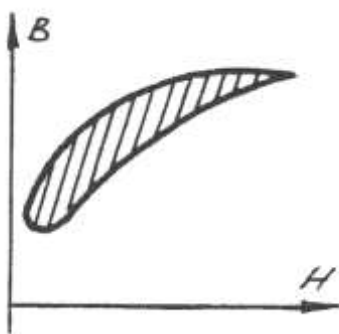


Рис. 4.4. – Крива намагнічування

Облік площі такої укороченою петлі, а значить і втрат є спеціальним питанням.

$$p_2 = \sigma_2 \cdot f \cdot B^2 \cdot m, \quad (4.2)$$

де σ_2 , Вт/кг - питомі втрати на гістерезис; f , Гц - частота; B , Тл - індукція в сталі та m , кг - маса сталі.

Слід зазначити, що при практичному проектуванні необхідно застосовувати магнітом'яку сталь (вузька петля гістерезису). Крім того, важливо пам'ятати, що втрати на гістерезис

$$p_2 \sim f, B^2, \quad (4.3)$$

На практиці використовувати (4.2) для визначення втрат на гістерезис складно через не постійні σ_2 і B . У цьому зв'язку експериментально визначають сумарні питомі втрати в одиниці маси на гістерезис і вихрові струми (Вт/кг) для конкретної сталі, при постійних частоті і індукції. Однак, при проектуванні слід знати, від чого залежить величина втрат в сталі на гістерезис і вихрові струми.

4.1.2. Втрати на вихрові струми

Як відомо, частина магнітопроводу, по якій замикається змінний магнітний потік з частотою f , виконують шихтованим. Товщина листа Δ може бути 0,20; 0,3; 0,5 і 1,0 мм. Листи сталі розташовують так, щоб магнітний потік входив у переріз з шириною Δ , де і виникають втрати на гістерезис та вихрові струми.

Для вивчення впливу окремих факторів на величину втрат на вихрові струми розглядають фрагмент листа сталі магнітопроводу, який має товщину Δ , довжину і висоту 1 метр, рис. 4.5.

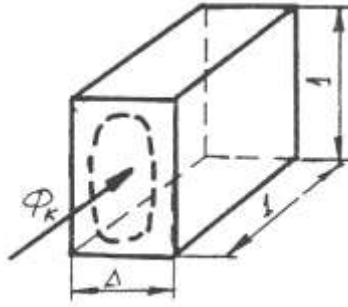


Рис. 4.5.

У загальному випадку для можна записати

$$p_{\text{вх}} = I_{\text{в}}^2 r_{\text{вх}}, \quad (4.4)$$

де $I_{\text{в}}$ - вихровий струм в контурі; $r_{\text{вх}}$ - вихровий активний опір контуру.

Використовуючи розміри і спрямування потоку в лист Φ_k рис. 4.5 можна записати

$$I_{\text{вх}} = E_{\text{вх}} / r_{\text{вх}}, \quad (4.5)$$

$$E_{\text{вх}} = \pi \sqrt{2} f_1 W_k \Phi_k, \quad (4.6)$$

$$r_{\text{вх}} \cong \rho_{\text{ст}} \cdot \frac{2\Delta + 2}{\frac{\Delta}{2} \cdot 1}, \quad (4.7)$$

де $\Phi_k = B_k \cdot (\Delta \cdot 1)$ - потік через переріз листа з розмірами зазначеними на рис. 4.5; $W_k = 1$ - кількість витків в контурі; $\rho_{\text{ст}}$ - питомий електричний опір конкретної електричної сталі, f_1 - частота зміни напруги мережі і потоку.

Підставивши вирази (4.5), (4.6) і (4.7) у вираз (4.4) отримаємо

$$p_{\text{вх}} = \frac{2\pi^2 f_1^2 B_k^2 \cdot (\Delta \cdot 1)^2}{\rho_{\text{ст}} \cdot \frac{2\Delta + 2}{\frac{\Delta}{2} \cdot 1}} = \frac{2\pi^2 f_1^2 B_k^2 \cdot \Delta^2}{\rho_{\text{ст}}}. \quad (4.8)$$

Зазвичай знаходять втрати від вихрових струмів на одиницю об'єму, тобто питомі,

$$p_{\text{ex yd}} = \frac{p_{\text{ex}}}{V} = \frac{2\pi^2 f_1^2 B_k^2 \Delta^2}{\rho_{\text{cm}}}, \quad (4.9)$$

де V - об'єм фрагмента листа.

З (4.9) слідують дуже важливі висновки щодо величин, які визначають втрат на вихрові струми. Вони залежать:

- пропорційно квадрату частоти, $p_{\text{ex}} \sim f_1^2$;
- пропорційно квадрату індукції в сталі магнітопроводу, $p_{\text{ex}} \sim B^2$;
- пропорційні квадрату товщини листа магнітопроводу, $p_{\text{ex}} \sim \Delta^2$;
- обернено пропорційні питомому електричному опору сталі, $p_{\text{ex}} \sim \frac{1}{\rho_{\text{cm}}}$.

Враховуючи, що машини загального призначення мають $f_1 = 50 \text{ Гц}$ і індукцію в окремих ділянках магнітного кола, що змінюється в невеликому діапазоні, то ці величини суттєво на зміни втрат на вихрові струми не впливають.

У той же час товщину листа заліза магнітопроводу Δ на практиці виконують від 0,2 мм до 0,5 мм. Заміна листа сталі з товщиною 0,5 мм на 0,35 призводить до зниження втрат від вихрових струмів у $(0,5/0,35)^2 \approx 2$ рази.

Зазначений вплив товщини листа дозволяє істотно зменшити втрати на вихрові струми від полів розсіювання у торцевих поверхнях зубців виконанням в зубцях просічки (розрізу) по рис. 4.6.

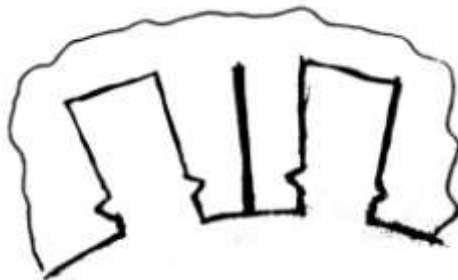


Рис. 4.6. – Втрати на вихрові струми

Залежність $p_{\text{ex}} \sim \frac{1}{\rho_{\text{cm}}}$ на практиці використовують застосуванням більш високої легованості сталі, тобто збільшенням вмісту кремнію (Si) в електротехнічній сталі. При цьому така сталь стає більш крихкою і з незначним погіршенням магнітної провідності (тобто магнітних властивостей), але має місце збільшення питомого електричного опору, що призводить до зниження втрат від вихрових струмів.

Практично окремо розрахунок втрат від вихрових струмів не проводиться через складність.

4.1.3. Основні втрати в сталі

На практиці основні втрати від основного магнітного потоку знаходять як суму втрат на гістерезис і на вихрові струми. При цьому використовують питомі втра-

ти $p_{y\partial.baz}$ конкретної марки сталі, експериментально отримані для одного (базового) значення частоти f_{baz} і індукції B_{baz} , і розраховують сумарні втрати в сталі для інших значень частоти f_x і індукції B_x за формулою

$$p_{cm} = p_{y\partial\left(\frac{B_{baz}}{f_{baz}}\right)} \cdot K_{gx} \cdot \left(\frac{f_x}{f_{baz}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_x}{B_{baz}}\right)^2 \cdot m_x, \quad (4.10)$$

де $p_{y\partial\left(\frac{B_{baz}}{f_{baz}}\right)}$ - сумарні питомі втрати (Вт/кг) при індукції B_{baz} і частоті f_{baz} ;

f_x і B_x - частота і індукція, для яких визначають втрати в масі m_x ; α - коефіцієнт, що враховує різну залежність від частоти втрат на гістерезис $p_e \sim f$ і втрат на вихрові струми ($p_{ex} \sim f^2$); K_{gx} - коефіцієнт, що враховує вплив механічної обробки електротехнічної сталі і технології (штампування, наявності задирок, відпал і т.п.).

У довідковій літературі та [1, 2] задаються таблицями значення питомих втрат $p_{y\partial\frac{1,0}{50}}$ при частоті $f_{baz} = 50 \text{ Гц}$ і індукції $B_{baz} = 1,0 \text{ Тл}$ для різних марок сталі їх товщині. З урахуванням цього формула (4.10) приймає вид

$$p_{cm.x} = p_{y\partial\frac{1,0}{50}} \cdot K_{gx} \cdot \left(\frac{f_x}{50}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{B_x}{1,0}\right)^2 \cdot m_x, \quad (4.11)$$

де коефіцієнт $\alpha \cong 1,3$ для частот від 100 Гц до 500 Гц, або $\alpha = 1,4 \dots 1,5$ при частотах від 500 Гц до 1000 Гц.

Формула (4.11) придатна для будь-якої ділянки магнітного кола з масою m при зміні основного потоку з частотою f_x і з індукцією на цій ділянці B_x .

Для електричних машин загального призначення частота $f = f_x = 50 \text{ Гц}$, а величина індукції B_x в окремих ділянках різна. Тоді втрати в сталі статора (якоря) машини змінного струму визначають як

$$p_{cm} = p_{y\partial\frac{1,0}{50}} \cdot (K_{gz} \cdot B_z^2 \cdot m_z + K_{ga} \cdot B_a^2 \cdot m_a), \quad (4.12)$$

де $p_{y\partial\frac{1,0}{50}}$ - питомі (сумарні на гістерезис і від вихрових струмів) втрати при частоті

$f = 50 \text{ Гц}$ і індукції $B = 1 \text{ Тл}$ для обраних марки і товщини листа електротехнічної сталі (вибирається з таблиці [2]), (Вт/кг); B_z - індукція в зубці, Тл; B_a - індукція в ярмі статора, Тл; K_{gz} і K_{ga} - відповідно коефіцієнти збільшення втрат в зубцях і ярмі, що враховують механічну обробку і технологію виготовлення.

Коефіцієнти K_{gz} і K_{ga} суттєво впливають на величину втрат у сталі, а їх величина залежить від потужності машин:

$K_{gz} \cong 1,5 \dots 2$ і $K_{ga} \cong 1,5$ для машин потужністю менше 160 кВт, де магнітопровід шихти на оправках, без зняття задирок на листах;

$K_{gz} \cong 1,7$ і $K_{ga} \cong 1,3$ для машин потужністю понад 160 кВт, де листи стали шліфують, знімаючи задирки.

У мікромашин коефіцієнти K_{gz} і K_{ga} суттєво зростають - до 5-7. Втрати в сталі якоря машин постійного струму обчислюють так само по (4.12). Слід звернути увагу на ті ділянки магнітного кола, де проходить основний потік, але його частота зміни $f = 0$ або близька до нуля. У цих ділянках втрати в сталі приймають рівними нулю, $p_{cm} = 0$, тобто не розраховуються.

До ділянок, де $f = 0$ відносять ярмо ротора і полюса синхронних машин, ярмо статора (станину) і полюси машин постійного струму. У робочих режимах ковзання асинхронних машин становить (5-1,5)%, що відповідає частоті перемагнічування (2,5...0,75) Гц. У цьому випадку втрати в сталі ротора не розраховують, а враховують, вводячи їх у додаткові 0,5% від P_2 .

На закінчення слід зазначити співвідношення між втратами на гістерезис і вихрових струмів. Вони складають відповідно близько 70 і 30 відсотків від загальної суми, тобто основна частина втрат в сталі на гістерезис.

4.2. Додаткові втрати в сталі магнітопроводу

До додаткових втрат відносять:

- поверхневі;
- пульсаційні;
- від полів розсіювання та інших явищ.

4.2.1. Поверхневі втрати

Поверхневі втрати обумовлені наявністю відкриття пазів (шліців), які призводять до зменшення індукції в повітряному проміжку над відкриттями (шліцами) зубців в порівнянні з гладкою поверхнею, коли відкриття пазів немає.

На рис. 4.7 показана якісна картина розподілів магнітних силових ліній і величини магнітної індукції в повітряному проміжку при наявності відкриття пазів на роторі і гладкою (без наявності відкритих пазів) поверхні статора.

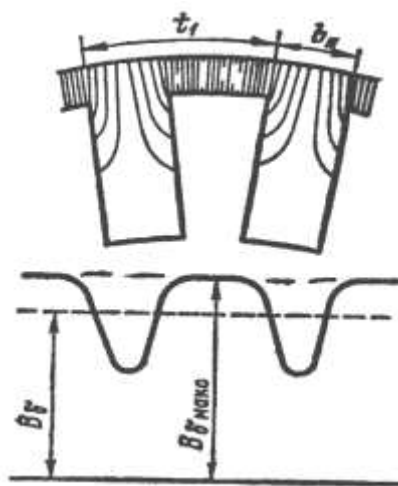


Рис. 4.7.

Як видно з рис. 4.7 величина $B_{\delta\max}$ під зубцем змінюється до $B_{\delta\min}$. В резуль-

таті середня величина індукції B_{δ} , приймаюча участь в перетворенні енергії, знижується.

Аналогічна картина має місце при односторонній зубчатості з відкритими пазами і синусоїдальним розподілом поля урахуванням шліців пазів, рис. 4.8.

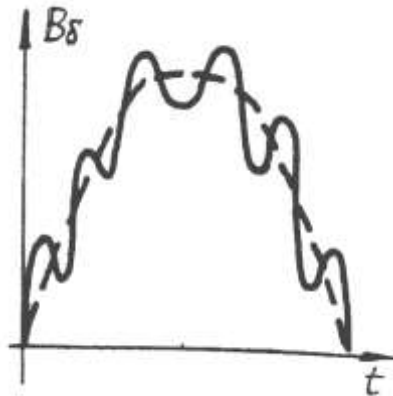


Рис. 4.8.

У таких випадках вважають, що в повітряному проміжку існує два поля: основне і порядку зубчатості. Втрати від магнітного поля основного поля розглянуті вище, а втрати від полів зубчатості, що мають частоту

$$f_z = n \cdot z, \quad (4.13)$$

де n - частота обертання основного поля або ротора, об/с; $z = p_z$ - число зубців або полюсів зубчатості.

Якщо для прикладу взяти $n = 50 \text{ об/с}$ ($2p = 2$) і кількість зубців $z = 36$, то $f_z = 50 \cdot 36 = 1800 \text{ Гц}$. Високі частоти мають місце і при інших значеннях n і z . Поля від зубцевих відкриттів пазів (шліців) при такій високій частоті зміни не можуть глибоко проникати у сталь пакетів магнітопроводу через демпферного (послаблюючого ці поля) ефекту. Тому втрати в сталі магнітопроводу від цих полів виділяються на невеликій глибині, тобто на поверхні. У цьому зв'язку додаткові втрати від відкриття шліців пазів називають поверхневими. При цьому слід відмітити, що зубчатість на одній поверхні в повітряному проміжку викликає втрати на протилежній стороні. Наприклад, від зубчатості статора поверхневі втрати будуть на поверхні ротора, і навпаки, зубчатість ротора обумовлює втрати на поверхні статора.

Оскільки відкриття зубців може бути на статорі і роторі, то поверхневі втрати будуть на обох поверхнях. Розрахунок їх проводиться з припущення, що при відкритті пазів на одній із поверхонь, протилежна поверхня є гладкою, і навпаки, рис. 4.9.

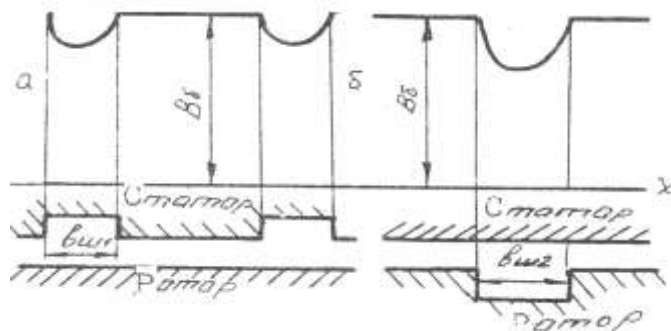


Рис. 4.9. – Вплив на поверхневі втрати відкриття пазів

В асинхронних машинах, характерна наявність відкритих пазів на статорі і роторі, спочатку визначають питомі поверхневі втрати Bm/m^2 за емпіричною формулою

$$P_{нов.уд.1(2)} = 0,5 \cdot K_{01(02)} \cdot \left(\frac{Z_{2(1)} \cdot n}{1000} \right) \cdot (B_{01(02)} \cdot t_{2(1)} \cdot 10^3)^2, \quad (4.14)$$

де індекс 1 відповідає втратам на поверхні зубців статора, а 2 - ротора;

0,5- величина, що враховує реакцію поверхневих струмів, які зменшують амплітуду первинного поля, яке було б при відсутності поверхневих струмів;

$K_{01(02)}$ - коефіцієнт, що враховує відповідно механічну обробку зубців статора і ротора, причому приймають $K_{01(02)} = 1,4 \dots 1,8$ для потужностей $P_2 \leq 160 \text{ кВт}$,

$K_{01(02)} = 1,7 \dots 2,0$ для потужностей $P_2 > 160 \text{ кВт}$ за рахунок шліфування поверхні зубців; $Z_{2(1)}$ - відповідно кількість зубців ротора і статора; $n = n_1(1-s)$ об/хв- частота обертання ротора; 1,5- коефіцієнт, що враховує поверхневі втрати на гістерезис і вихрові струми; $B_{01(02)} = \beta_{01(02)} K_\delta B_\delta$ - амплітуда пульсацій індукції в повітряному проміжку над коронками зубців відповідно статора і ротора; $\beta_{01(02)}$ - коефіцієнт, що залежить відповідно від відношення ширини шліца пазів ротора до повітряного проміжку b_{u2}/δ для статора, а для ротора - навпаки від b_{u1}/δ ; ця залежність $\beta = b_{uu}/\delta$ показана на рис. 4.10; $t_{2(1)}$ - зубцевий крок відповідно для зубців ротора і статора;

K_δ - коефіцієнт повітряного проміжку; $b_{u1(2)}$ - відповідно розмір шліца пазів статора і ротора.

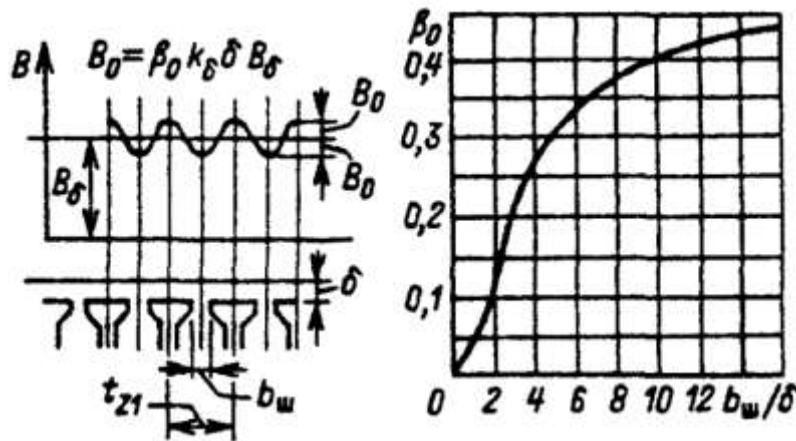


Рис. 4.10. – Залежність $\beta = f(b_{uu}/\delta)$

Повні поверхневі втрати

$$P_{нов1(2)} = P_{нов.уд.1(2)} \cdot (t_{1(2)} - b_{u1(2)}) \cdot Z_1 \cdot L_{Fe}, \quad (4.15)$$

де L_{Fe} - довжина чистого заліза магнітопроводу.

Для синхронних явнополюсних машин поверхневі втрати на поверхні полюсних наконечників від наявності шліців пазів статора визначають як

$$P_{нов} = 0,5 \cdot 2p \cdot \alpha \cdot \tau \cdot L_{Fe} \cdot K_0 \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3}, \quad (4.16)$$

де $0,5$ - коефіцієнт враховує реакцію вихрових струмів на поверхні полюсів; $2p$ - кількість полюсів; α - коефіцієнт полюсного перекриття; τ - полюсне ділення; L_{Fe} - довжина чистої сталі полюса; K_0 - коефіцієнт, що дорівнює $K_0 = 4,6$ при шихтовці полюсів з листів сталі товщиною 1 мм, $K_0 = 8,6$ при товщині листів сталі 2 мм, і $K_0 = 23,3$ - при масивних полюсних наконечниках; Z_1 - кількість зубців статора; $n = n_1$ - частота обертання ротора; $1,5$ - коефіцієнт, що враховує спільні втрати на гістерезис і від вихрових струмів з урахуванням високої частоти пульсацій індукції; $B_0 = B_{0\delta}(K_{\delta 1} - 1)$ - амплітуда пульсацій індукції від наявності шліців пазів статора, Тл; $B_{0\delta}$ - амплітуда індукції в повітряному зазорі при, Тл; t_1 - зубцевий крок статора; $K_{\delta 1}$ - коефіцієнт повітряного зазору статора.

Використовуючи вирази (4.16), можна знайти поверхневі втрати на полюсах машини постійного струму, а при наявності шліців пазів для компенсаційної обмотки, що розташовується в полюсних наконечниках, застосувати (4.14) і (4.15).

Варто відзначити, що наявність відкритих (шліців) пазів призводить до зменшення індукції $B_{0\delta}$, розрахованої при $E = K_E \cdot U_{нф}$. Щоб зберегти це значення, потрібне збільшення МРС повітряного проміжку. Це збільшення МРС здійснюється введенням в розрахунок МРС повітряного проміжку коефіцієнта повітряного проміжку $K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}$.

4.2.2. Пульсаційні втрати

Ці втрати виникають при наявності двосторонньої зубчастості з шліцами пазів. У цьому випадку магнітна провідність (магнітний опір) повітряного зазору змінюється від $\lambda_{\delta \max}$, коли осі зубців статора і ротора співпадають, до $\lambda_{\delta \min}$, коли вісь зубця збігається з віссю паза зі шліцом. Така зміна магнітної провідності повітряного проміжку призводить до пульсацій потоку в зубцях.

Ця частота пульсацій значно вище частоти пульсацій основного потоку. Прийнято розраховувати втрати в зубцях від цих високочастотних пульсацій, які обумовлені зміною магнітної провідності повітряного проміжку і мають амплітуду пульсацій $B_{пульс}$. Такі втрати відносять до додаткових і називають пульсаційними.

Найчастіше пульсаційні втрати розраховують в асинхронних машинах, бо вони мають шліци пазів на роторі і статорі. У цьому випадку пульсаційні втрати виділяються як в зубцях статора, так і в зубцях ротора.

Для визначення пульсаційних втрат спочатку знаходять амплітуду пульсацій індукції в середньому перерізі зубця для статора і ротора

$$B_{пуль. 1(2)} \approx \frac{\gamma_{2(1)} \delta}{2t_{1(2)}} B_{z1(2)cp}, \quad (4.17)$$

де $B_{пуль. 1(2)}$ - амплітуда пульсацій індукції в середньому перетині зубця статора (1) і ротора (2);

$$\gamma_{2(1)} = \frac{\left(\frac{b_{ш2(1)}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{ш2(1)}}{\delta}} - \text{коефіцієнт відповідно для статора (2) і ротора (1);}$$

$b_{ш2(1)}$ - шліц паза відповідно ротора і статора; δ - величина повітряного проміжку; $t_{1(2)}$ - відповідно зубцевий крок статора і ротора; $B_{z1(2)}$ - індукція основного поля в середній частині зубця для статора (1) і ротора (2).

При відкритих пазах у виразах для $\gamma_{2(1)}$ використовують величини шліца

$$b'_{ш1(2)} = \frac{b_{ш1(2)}}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5t_{1(2)}}{t_{1(2)} \cdot b_{ш1(2)} + ae_{\delta}}\right), \quad (4.18)$$

де індекс 1 відповідає розрахунку для розрахункової величини шліца статора, а 2- ротора; ae_{δ} - коефіцієнт, величина якого залежить від відношення $\frac{b_{ш}}{\delta}$.

З урахуванням (4.17) пульсаційні втрати розраховують

$$p_{пуль1(2)} \approx 0,11 \left(\frac{z_{1(2)} \cdot n}{10000} B_{пуль1(2)} \right)^2 m_{z1(2)}, \quad (4.19)$$

де $n = n_1 \cdot (1 - s)$ - частота обертання ротора, об/хв; $m_{z1(2)} = h_{z1(2)} b_{zcp1(2)} Z_{1(2)} K_{с\gamma c}$ - маса зубців; $h_{z1(2)}$ - висота зубця статора (1) або ротора (2); $b_{zcp1(2)}$ - середня ширина зубців; $Z_{1(2)}$ - кількість зубців (пазів); $K_{с\gamma c} = 0,95 \dots 0,97$ - коефіцієнт заповнення пакета магнітопроводу сталлю; $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - питома маса електротехнічної сталі.

4.2.3. Додаткові втрати від полів розсіювання та інших явищ

При навантаженні асинхронних двигунів виникають додаткові втрати за рахунок потоків розсіювання, пульсацій індукції в повітряному проміжку, ступінчастості кривих розподілу МДС обмоток статора і ротора вздовж полюсного поділу, поперечними струмами (між стержнями) у к.з обмотках і т.п.

Додаткові втрати від цих явищ усереднюють і згідно чинних стандартів приймають 0,5% номінальної потужності, їх сумують з розрахунковими додатковими втратами.

Розраховуючи ККД для навантажень відмінних від номінальних, ці втрати уточнюються як

$$p_{доб} = p_{доб.н} \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2, \quad (4.20)$$

де $p_{доб.н} = 0,005 P_{2н}$ - додаткові втрати від струмів номінального навантаження

У синхронних машинах додаткові втрати виникають через вихрові струми в обмотках статора при навантаженні, а також в полюсних наконечниках від вищих

гармонік магнітного поля якоря. У цьому випадку величину додаткових втрат при навантаженні приймають 0,5% від корисної потужності генераторів або підведеної потужності двигуна, потужності яких не більше 1000 кВА, а при великих потужностях приймають 0,25...0,4%.

Додаткові втрати в машинах постійного струму при номінальному навантаженні приймають для некомпенсованих машин

$$p_{\text{доб}} = 0,01 \frac{P_n}{\eta_n}, \quad (4.21)$$

а для компенсованих машин

$$p_{\text{доб}} = 0,005 \frac{P_n}{\eta_n}, \quad (4.22)$$

де η_n - попереднє значення ККД, що задається рекомендаціями.

РОЗДІЛ № 5. ПАРАМЕТРИ ЯКІРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

5.1. Загальні відомості

Під параметрами якірних обмоток для сталих режимів роботи розуміють:

- активні опори якоря (статора асинхронних) машин;
- реактивно-індуктивні опори взаємоіндукції;
- реактивно-індуктивні опори розсіювання.

Слід розрізняти омичний і активний опір. Омичний опір обмоток - опір при протіканні постійного струму, а активний - при змінному струмі. У якірних обмотках, як правило, протікають змінні струми, тому розглядають активний опір.

Омичний і активний опір по суті є моделями (коефіцієнтами), які з урахуванням протікаючого струму дозволяють розрахувати величину втрат активної потужності у провідниках обмоток якоря. Втрати у провідниках при одній і тій же величині діючого струму на змінному струмі більше ніж на постійному струмі, тому омичний опір менший активного для однієї і тієї ж якірної обмотки. Це збільшення активного опору в порівнянні з омичним прийнято вважати впливом ефекту витіснення.

Активні опори обмоток r_a порівняно невеликі і впливають:

- на величину активних втрат в обмотці якоря;
- на величину ККД машини;
- на ступінь нагрівання обмотки якоря;
- на швидкість загасання перехідних процесів.

Реактивно-індуктивний опір взаємоіндукції x_m (аналогічно активному опору) є моделлю (або коефіцієнтом), при множенні якого на відповідний струм намагнічування визначає ЕРС в якорі від основного (або взаємоіндукції) потоку. По суті величина x_m характеризує ступінь магнітного зв'язку між обмотками статора і ротора. У явнополюсних синхронних машинах розрізняють індуктивності взаємоіндукції по поздовжній x_{ad} і поперечній x_{aq} осях.

Індуктивний опір взаємоіндукції є суттєво важливим параметром:

- характеризує магнітний зв'язок між статором і ротором, а значить впливає кількісно на процес перетворення енергії;
- визначає потужність (або струм збудження, або намагнічування) системи збудження;
- впливає на перевантажувальну здатність синхронних машин;
- має залежність $x_m \sim 1/\delta$.

Реактивно-індуктивний опір розсіювання по аналогії з опором взаємоіндукції є моделлю, яка характеризує (при перемножуванні на відповідний струм) ЕРС, обумовлену потоками розсіювання. Позначаються ці опори x_1 - для потоків розсіювання обмоток статора і x_2 для потоків розсіювання обмоток ротора. Величини цих опорів відіграють важливу роль:

- визначають потоки розсіювання, які не беруть участь в процесі перетворення енергії;
- обмежують сплески струмів;
- впливають на загасання перехідних процесів.

Перераховані параметри є елементами математичної моделі електричної машини у вигляді схем заміщення.

Як правило, перераховані параметри виражають у відносних одиницях. Це обумовлено тим, що їх межі зміни у відносних одиницях невеликі і, крім того, чисельні значення їх у відносних одиницях дозволяють здійснювати контроль правильності результатів розрахунків при проектуванні.

За одиниці прийняті: для напруг - номінальну фазну напругу; за одиницю для струмів - номінальний фазний струм; за одиницю для опорів - базисний опір, рівний відношенню фазних номінальних величин напруги до струму.

5.2. Активний опір якірних обмоток

Величину цього опору визначають для однієї фази машин змінного струму і всього якоря машин постійного струму.

У загальному вигляді для машин змінного струму активний опір при температурі t

$$r_t = \rho_t \frac{l_{w.cp} \cdot w}{a \cdot q_{ef}} \cdot K_R, \quad (5.1)$$

де, ρ_t - питомий опір провідників обмотки при температурі $t = 75^\circ\text{C}$ для класів нагрівостійкості А і В, або $t = 115^\circ\text{C}$ для класів нагрівостійкості F і H; $l_{w.cp}$ - середня довжина витка обмотки, яка дорівнює сумі активної довжини витка $2l_a$ і лобових частин $2l_{лоб}$ обмотки, тобто $l_{w.cp} = 2(l_a + l_{лоб})$; $w = \frac{U_n z_1}{2am}$ - кількість послідовних витків у фазі (якоря) обмотки; a - кількість паралельних віток обмотки; q_{ef} - ефективний переріз провідника обмотки; K_R - коефіцієнт враховує ефект витиснення або збільшення омичного опору.

Для машин постійного струму активний опір якоря при температурі t

$$r_{at} = \rho_{at} \cdot \frac{l_{aw.cp} \cdot w_a}{2 \cdot a \cdot q_{ef}} \cdot K_R, \quad (5.2)$$

де, a - кількість пар паралельних віток; ρ_{at} - питомий електричний опір провідників якоря при температурі $t = 75^\circ\text{C}$ для класів нагрівостійкості ізоляції В, або $t = 115^\circ\text{C}$ для класів F и H; $l_{aw.cp}$ - середня довжина витка обмотки якоря, яка дорівнює $l_{aw.cp} = 2(l_a + l_{лоб})$; $w_a = \frac{N}{4a}$ - кількість послідовних витків якоря, або кількість витків в одній паралельній гільці.

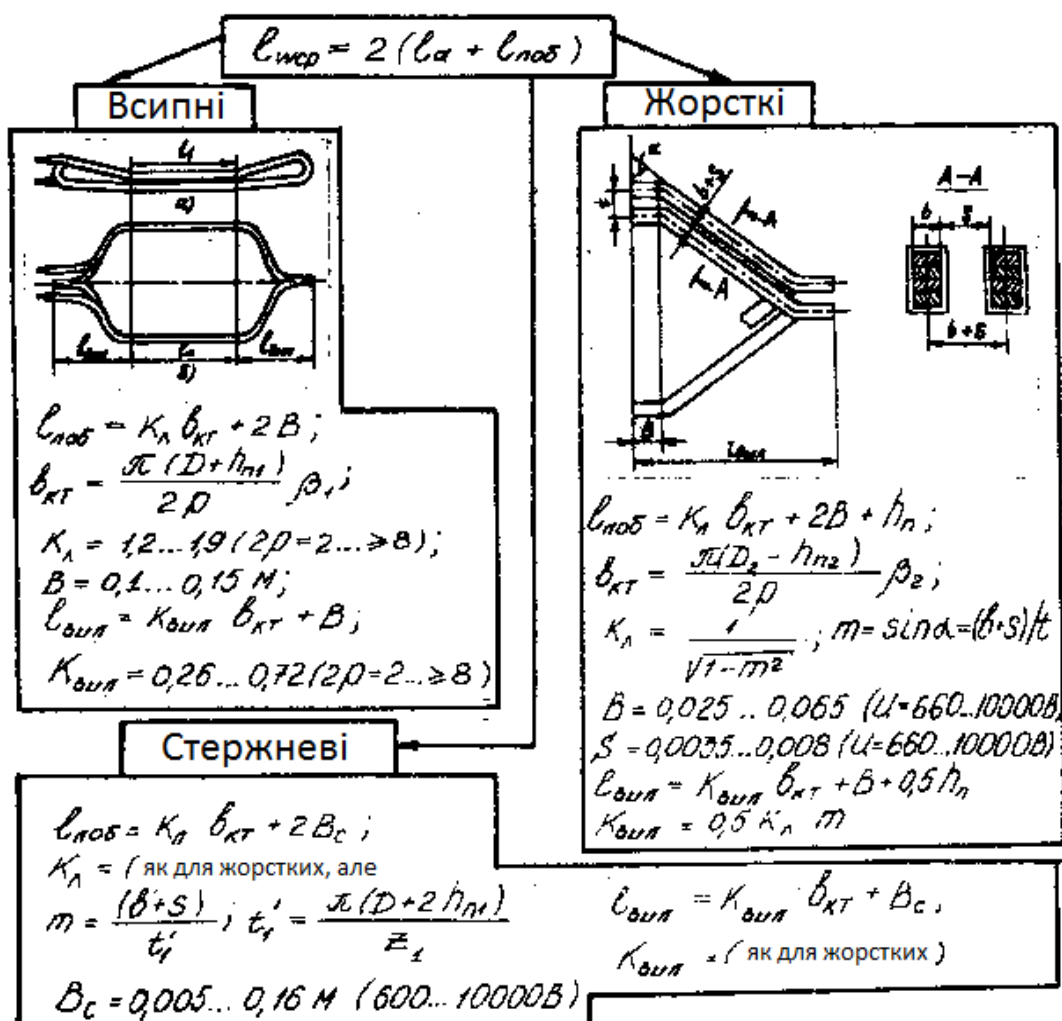
Інші величини (5.2) мають той же сенс що і в (5.1). Для обчислення активних опорів якоря по (5.1) і (5.2) відомими з попереднього розрахунку якірних обмоток є: кількість паралельних гілок, ефективний перетин провідника, а чисельне значення ρ_t задають в залежності від прийнятої розрахункової температури, табл. 5.1. Відомою є й довжина активної частини l_a . Залишається тільки визначити середню довжину витка і коефіцієнт, що враховує ефект витиснення.

Таблиця 5.1 – Питомий опір провідника

Матеріал провідника	Питомий опір провідника, Ом·м		
	20°C	75°C	115°C
Мідь	$\frac{1}{57} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{47} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{41} \cdot 10^{-6}$
Алюміній	$\frac{1}{30} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{24} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{22} \cdot 10^{-6}$

Величину середньої довжини витка обмоток $l_{w,cp}$ розраховують з урахуванням конструктивного типу обмотки і типу електричної машини.

На рис. 5.1 наведені формули для розрахунку $l_{w,cp}$ всипної, жорсткої і стрижневої обмотки машин змінного струму, а на рис. 5.2 - для жорстких обмоток машин постійного струму.

Рис. 5.1. - Розрахунок $l_{w,cp}$

Використовуючи фрагмент рис. 5.1, більш докладно (у якості прикладу) розглянуті формули для визначення довжини лобової частини всипної обмотки з розшифровкою позначень:

D – діаметр розточки статора;

$h_{П1}$ – висота пазу статора;

$2p$ – число полюсів машин;

b_{KT} – середня довжина дуги між пазами, в яких лежать сторони однієї і тієї ж котушки;

K_L – коефіцієнт лобових частин, що враховує подовження лобової частини котушки за рахунок вильоту і відгину;

$\beta_1 = \frac{y}{\tau}$ – коефіцієнт враховує скорочення (або подовження) кроку обмотки по пазах;

$B = 0,01...0,015\text{ м}$ – довжина прямолінійного вильоту лобових частин з пазу;

$l_{вил}$ – довжина вильоту лобових частин уздовж осі валу (від торця магнітопроводу у сторону підшипникового щита);

$K_{вил}$ – коефіцієнт вильоту лобових частин.

Аналогічний порядок розрахунку (із зазначенням формул на рис. 5.1) поданий для жорстких і стрижневих якірних обмоток машин змінного струму. Слід зазначити, що коефіцієнти K_L і $K_{вил}$ визначають на підставі практичних рекомендацій. На рис. 5.2 наведені зображення жорстких секцій для машин постійного струму, їх розміри для хвильової і петльової обмоток і вирази для розрахунку довжини лобових частин.

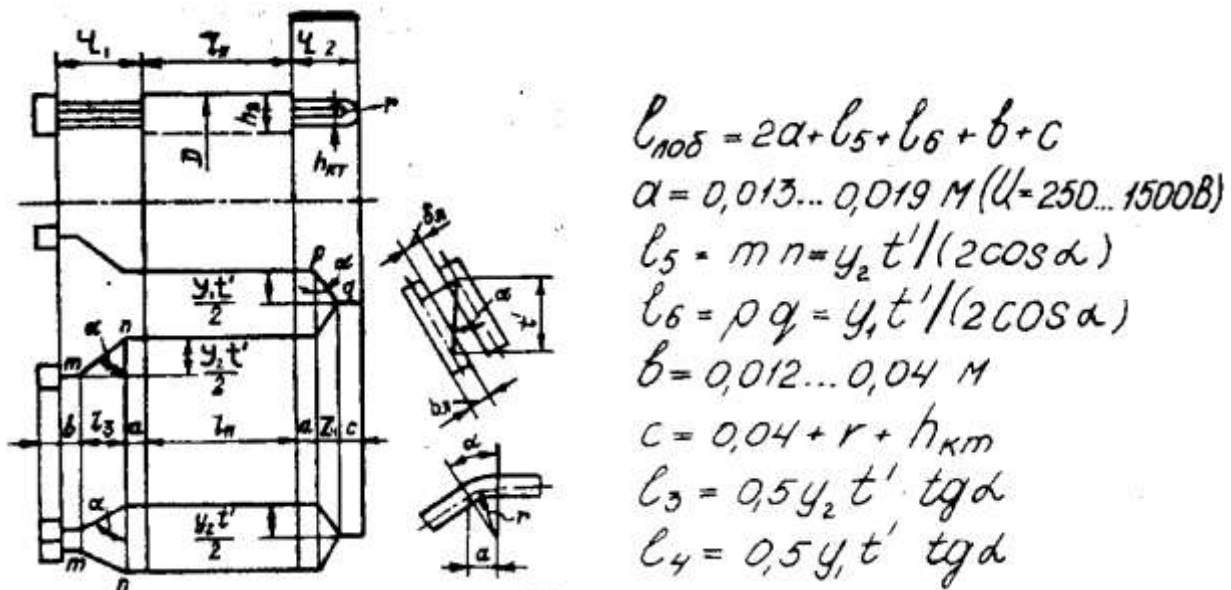


Рис. 5.2. – Розрахунок $l_{w,cr}$ для МПС

Для усіх конструктивних типів обмотки довжина l_a відповідає довжині пакету магнітопроводу якоря при відсутності охолоджувальних радіальних каналів, а при наявності радіальних каналів - відстані між торцями крайніх пакетів якоря.

Середню довжину витка визначають подвоєною сумою

$$l_{w,cr} = 2(l_a + l_{лоб}). \quad (5.3)$$

Попутно з розрахунком $l_{w,cr}$ визначають виліт лобових частин $l_{вил}$ з метою раціонального розміщення підшипникових щитів.

Коефіцієнт K_R , враховує вплив змінного струму, по суті характеризує відношенням втрат на змінному струмі до втрат на постійному струмі при одному і тому

ж діючому значенні струму в обмотці якоря

$$K_R = \frac{P_{\sim}}{P_{=}} > 1, \quad (5.4)$$

При змінному струмі має місце збільшення втрат за рахунок нерівномірного розподілу густини струму j по перетину провідника, при цьому густина струму збільшується до периферії провідника. Це явище трактують як ефект витиснення. Для наочності впливу змінного струму (або ефекту витиснення) на рис. 5.3 приведена частина (як умовна модель) провідника, по якому протікає діюче значення струму в 1 ампер. При постійному струмі має місце рівномірний розподіл струму на умовно обраних ділянках (рис. 5.3а). Втрати в цьому випадку становлять 1 Вт.

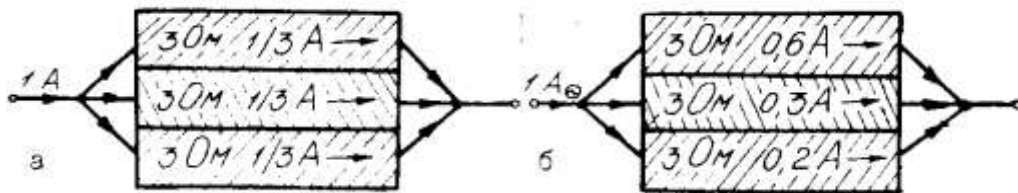


Рис. 5.3. – До ефекту витиснення струму

На рис. 5.3 б умовно прийнято розподіл діючих струмів, моделюючих ефект витиснення, по тих же ділянках, при цьому втрати становлять 1,38 Ватт. Отже, коефіцієнт втрат $K_R = 1,38/1,0 = 1,38$, що показує збільшення втрат при змінному струмі на 38% по відношенню до втрат на постійному струмі, або збільшення на 38% активного опору в порівнянні з омичним.

Вперше відміну розрахункових втрат по омичного опору та реальних втрат на змінному струмі було зафіксовано при виготовленні якорних обмоток з перетином провідників понад 17...20 мм². У літературі можна зустріти назву K_R як коефіцієнт Фільда. Саме Фільд поклав початок вивченню впливу змінного струму на втрати у електричних машинах змінного струму середніх і великих потужностей.

Оскільки додаткові втрати в обмотках від змінного струму залежать від величини магнітного потоку, перетинаючого цей провідник, то розрізняють дві складові K_R : пазову K_{RII} і лобову K_{RLIO} .

Пазова складова K_{RII} враховує вплив ефекту витиснення тільки для тієї частини обмотки якоря, яка розташована в пазах. Цю складову рекомендують визначати як

$$k_{RII} = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi), \quad (5.5)$$

де $\varphi(\xi)$ - функція, що характеризує вплив поля від власних струмів;

$\frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi)$ - функція, що враховує вплив полів від струмів найближчих провідників паза; m - число провідників по висоті паза (рис. 5.4).

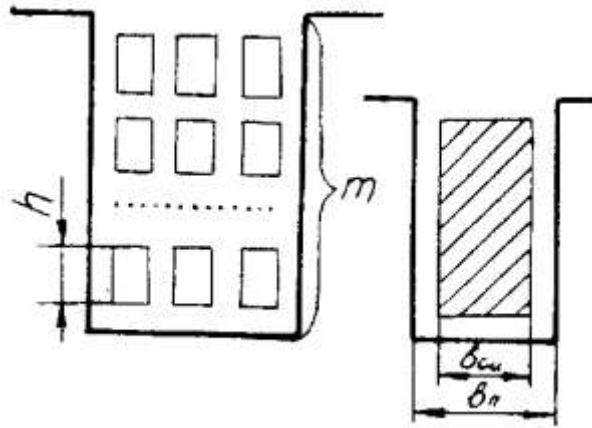


Рис. 5.4.

Функції що враховують вплив полів, визначаються виразами

$$\begin{aligned}\varphi(\xi) &= \xi \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi} \\ \psi(\xi) &= 2\xi \frac{\operatorname{sh} \xi + \sin \xi}{\operatorname{ch} \xi - \cos \xi}\end{aligned}\quad (5.6)$$

де $\xi = \alpha \cdot h$ - приведена величина висоти провідника h ;

$\alpha = \sqrt{\frac{b_{cu} \cdot \mu_0 \omega}{b_n \cdot \rho_{cu}}}$ - коефіцієнт приведення; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м- магнітна проникність повітря; $\rho_{cu} = 2 \cdot 10^{-6}$ Ом · м- питомий опір міді; b_{cu} , м- ширина міді в пазу (рис. 5.4); ω , рад/с- частота струму; b_n , м- ширина паза (рис. 5.4).

На практиці для визначення величин функцій $\varphi(\xi)$ і $\psi(\xi)$ використовують графічні залежності на рис. 5.5.

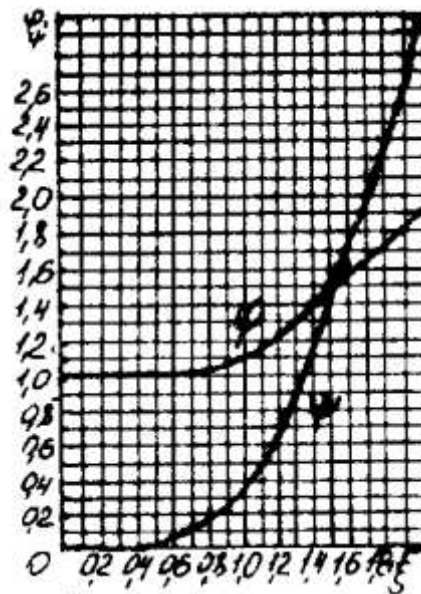


Рис. 5.5. - Залежність $\varphi(\xi)$ і $\psi(\xi)$

В області малих значень $\xi (0 < \xi < 1)$ знаходження функцій $\varphi(\xi)$ і $\psi(\xi)$ здійснюють за спрощеними виразами

$$\begin{aligned}\varphi(\xi) &= 1 + \frac{4}{45} \xi^4 \\ \psi(\xi) &= \frac{1}{3} \xi^4\end{aligned}\quad (5.7)$$

В області великих значень $\xi (\xi > 2)$ використовують вирази

$$\begin{aligned}\varphi(\xi) &= \xi \\ \psi(\xi) &= 2\xi\end{aligned}\quad (5.8)$$

Коефіцієнт K_R враховує спільний вплив ефекту витиснення в пазовій $K_{RП}$ і в лобовій $K_{RЛ}$ частинах обмотки якоря машин змінного струму, визначають формулою

$$K_R = \frac{K_{RП} l_a + k_{RЛ} l_{лоб}}{l_a + l_{лоб}} \approx \frac{K_{RП} + \frac{l_{лоб}}{l_a}}{1 + \frac{l_{лоб}}{l_a}} \quad (5.9)$$

Для обмотки якорів машин постійного струму коефіцієнт ефекту витиснення розраховують, виходячи з уявлення трапецеїдальної зміни струму (крива 1 на рис. 5.6) у вигляді синусоїди (крива 2 рис. 5.6).

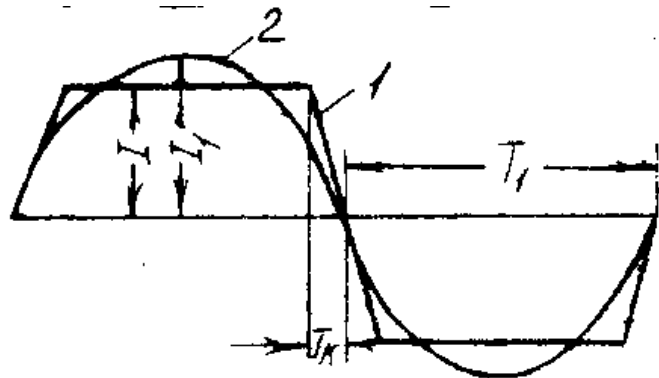


Рис. 5.6. - До розрахунку ефекту витиснення струму

Це дозволяє обчислити коефіцієнт витиснення з пазової частини як

$$k_{П} = 1 + \frac{4}{3\pi} m^2 \xi^2 \quad (5.10)$$

де $\xi = 0,15 h \sqrt{f}$ - коефіцієнт приведення висоти провідника h для частоти f .

Загальний коефіцієнт для всієї обмотки (з урахуванням впливу в лобових частинах) рекомендують знаходити для обмотки якорів машин постійного струму як

$$k_R = 1 + \frac{4}{3\pi} m^2 \xi \frac{l_a}{l_a + l_{лоб}} \quad (5.11)$$

Таким чином, всі величини, що входять в (5.1) і (5.2), визначені, що дозволяє знайти чисельні значення активних опорів якірних обмоток машин змінного і постійного струмів.

На закінчення слід зробити наступні висновки і рекомендації:

- величина коефіцієнта K_R залежить від частоти f у провідниках (чим більше f тим більше K_R , залежність нелінійна);
- переріз елементарного провідника не повинно перевищувати $17...20 \text{ мм}^2$;
- розміщувати провідник прямокутного перерізу більшою стороною слід паралельно дну паза, враховуючи напрям полів пазового розсіювання (від стінки паза до стінки паза);
- у тихохідних машинах постійного струму з частотою струму в якорі менше 50 Гц іноді виконують провідники з більшою стороною паралельно стінці пазу;
- для всипної обмотки коефіцієнт $K_R \approx 1$, бо діаметр круглого провідника не перевищує 1,4 мм.

Особливо слід зазначити, що в машинах великих потужностей з кількістю паралельних гілок дві і більше враховують вплив циркуляційних струмів між паралельними гілками через нерівності їх ЕРС і опорів.

5.3. Індуктивний опір взаємоіндукції

Цей опір, по суті, моделює основний магнітний потік, який створює ЕРС, що визначає величину перетвореної енергії в машині. Історично склалося так, що опір взаємоіндукції позначається x_m в трансформаторах і асинхронних машинах, а у явнополюсних синхронних машинах - x_{ad} і x_{aq} .

Як відомо із загального курсу електричних машин і трансформаторів ці параметри використовуються у відповідних схемах заміщення.

Розрахунковий вираз для індуктивності взаємоіндукції електричних машин зручніше отримати, розглядаючи асинхронну машину, для якої

$$x_m = \frac{E_1}{I_m} \quad (5.12)$$

де E_1 - ЕРС обмотки статора при неробочому ході; I_m - струм намагнічування у цьому режимі.

Для отримання виразу для x_m по вже попередньо відомим розрахунковим величинам запишемо

$$E_1 = \pi \sqrt{2} f_1 w_1 \Phi k_{o\delta 1} \quad (5.13)$$

де величину основного потоку визначають за законом Ома для магнітного кола

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (5.14)$$

Із загальної теорії машин змінного струму відомо, що амплітуда МРС фази

$$F = 0,45m \frac{w_1 k_{o\delta 1}}{p} I_m \quad (5.15)$$

Магнітний опір кола машини в (5.14) можна визначити через магнітний опір повітряного проміжку і коефіцієнт насичення k_n як

$$R_m = \frac{\delta'}{\mu_0 \cdot \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta} \quad (5.16)$$

де δ' - ефективний повітряний проміжок; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м- магнітна проникність повітря; α_δ - коефіцієнт полюсного перекриття для синусоїдального розподілу магнітного поля в повітряному проміжку; l_δ - розрахункова довжина статора; τ - полюсна поділка.

Необхідність добутку магнітного опору на коефіцієнт насичення впливає з рис. 5.7.

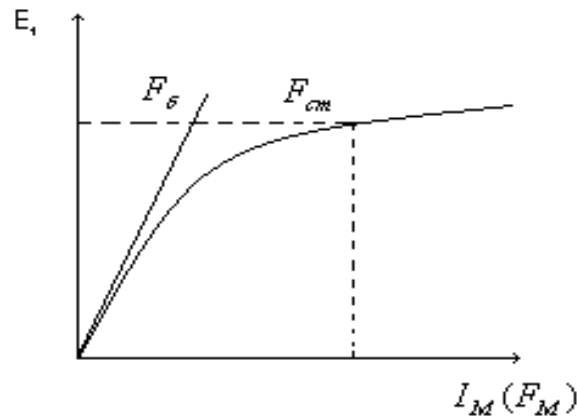


Рис. 5.7. - Визначення k_μ

Підставляючи в (5.12) вираз (5.14) з урахуванням (5.15) і (5.16), отримаємо

$$x_m = \frac{E_1}{I_m} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \cdot m \cdot f_1 \frac{(w_1 \cdot k_{o\delta 1})^2}{\delta' \cdot p \cdot k_n} \tau \cdot l_\delta \quad (5.17)$$

Аналіз (5.17) дає, що величина індуктивного опору взаємоіндукції:

- пропорційна величині частоти;
- пропорційна квадрату добутку послідовних витків у фазі на обмотувальний коефіцієнт;
- пропорційна добутку полюсної поділки на розрахункову довжину;
- обернено пропорційна величині ефективного повітряного проміжку, числу пар полюсів і насиченню магнітного кола машини.

Послідовність виведення x_m показана на опорному конспекті (рис. 5.8).

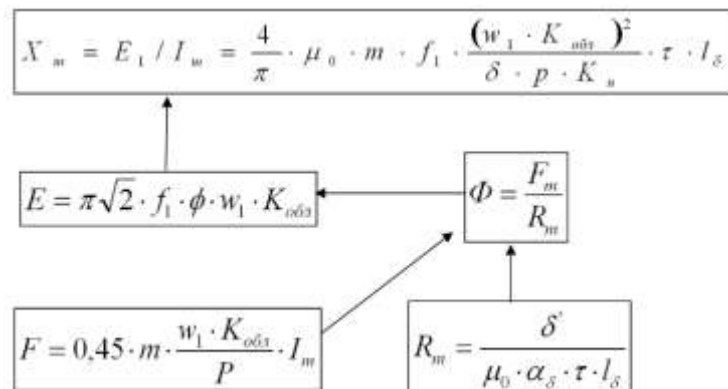


Рис. 5.8.

5.4. Індуктивний опір розсіювання

Цей опір є математичною моделлю відповідної ЕРС, створюваної потоками розсіювання.

Розрізняють три складові загального індуктивного опору від магнітних потоків розсіювання:

- пазового;
- лобового;
- диференціального.

У спрощеному вигляді ці складові показані на рис. 5.9, де Φ_n - потоки пазового розсіювання, Φ_δ - лобового розсіювання і Φ_σ - диференціального.

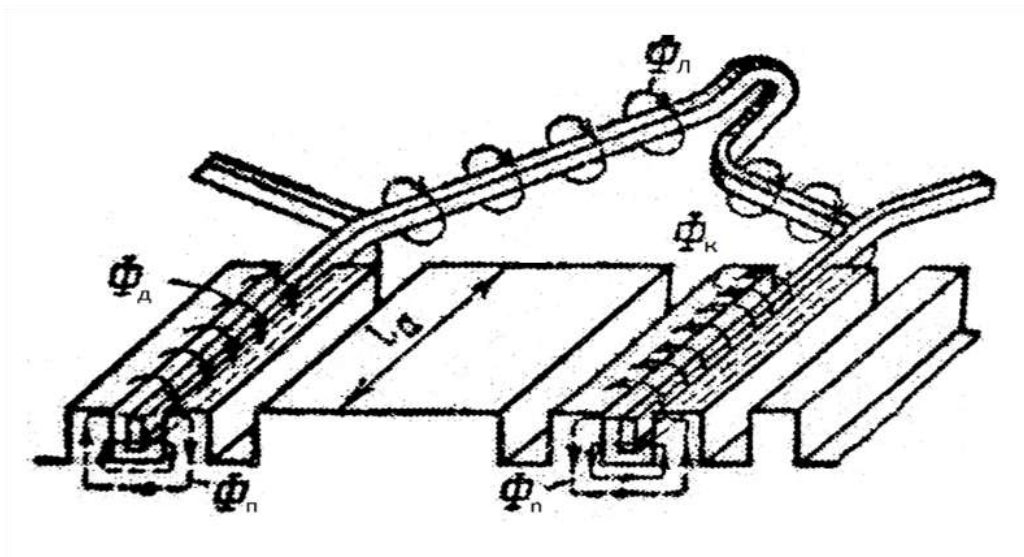


Рис. 5.9. – Складові потоків розсіювання

5.4.1. Індуктивний опір від магнітного потоку пазового розсіювання

Окремо магнітні потоки пазового розсіювання показані на рис. 5.10.

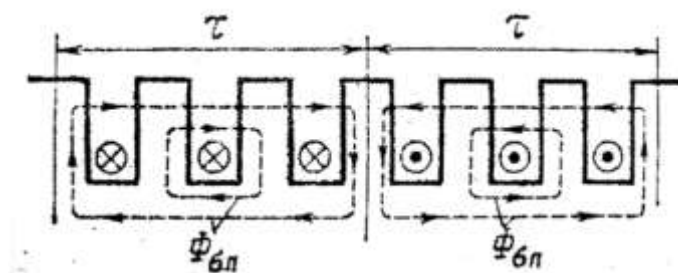


Рис. 5.10.

Отримання аналітичного виразу для індуктивного опору пазового розсіювання починаються з прийняття наступних спрощень:

- обмотка одношарова;
- провідники, обмотка рівномірно розподілені по перерізу паза;
- густина струму в провідниках паза однакова;
- магнітна провідність сталі зубців і ярма, оточуючих провідники паза, дорівнює нескінченності, тобто магнітний опір дорівнює нулю, $R_m = 0$;

- магнітні силові лінії потоку пазового розсіювання перпендикулярні осі паза.

З урахуванням прийнятих спрощень, зображуючи паз, наведений на рис. 5.11, де вказані розміри паза, повністю заповненого одношарової обмоткою, та шляхи замикання магнітних силових ліній пазового потоку розсіювання.

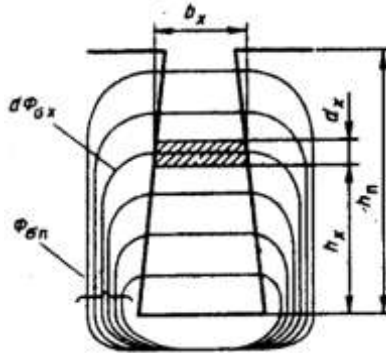


Рис. 5.11.

На рис. 5.11 виділено трубку магнітних силових ліній потоків пазового розсіювання товщиною d_x , довжиною b_x , і на висоті h_x від дна паза.

Індуктивний опір від пазового потоку розсіювання

$$x_{\sigma n} = \frac{x'_{\sigma n}}{a} \quad (5.18)$$

де $x'_{\sigma n}$ - індуктивний опір від потоку пазового розсіювання однієї паралельної гілки обмотки; a - кількість паралельних віток обмотки.

Ввівши поняття індуктивного опору від потоку пазового розсіювання на одиницю довжини паза L_n' , можна записати

$$x'_{\sigma n} = \frac{\omega}{a} \cdot L_n' \cdot l_{\delta} \cdot \frac{z}{a \cdot m} \quad (5.19)$$

де $\omega = 2\pi f_1$ - кутова частота; l_{δ} - розрахункова довжина магнітопроводу; z - кількість зубців; m - кількість фаз.

Подальші перетворення зводяться до отримання аналітичного виразу для L_n' і підстановкою його в (5.19).

З відомого виразу індуктивність від потоку пазового розсіювання

$$L_n' = \frac{\psi'_{\sigma n}}{I} \quad (5.20)$$

де $\psi'_{\sigma n}$ - потокозчеплення від пазового розсіювання на одиницю довжини паза; I - струм що протікає по провіднику в пазу.

Для виділеної трубки потоку пазового розсіювання на рис. 5.11 справедливо

$$d \cdot \psi'_{\sigma n} = N_x \cdot d \cdot \Phi_{\sigma x} \quad (5.21)$$

де N_x - кількість провідників паза, охоплюваних трубкою; $d\Phi_{\sigma x}$ - магнітний потік пазового розсіювання, виділеної трубки.

Для цієї трубки справедливий вираз

$$d\Phi_{\sigma x} = d(F_x \cdot \lambda_x) = F_x d\lambda_x = (N_x I) \cdot \mu_0 \frac{dx}{b_x \cdot 1} \quad (5.22)$$

Підставивши (5.22) у (5.21) і проінтегрувавши отримано потокозчеплення від потоку пазового розсіювання на одиницю довжини паза

$$\psi'_{\sigma n} = \mu_0 \cdot I \cdot \int_0^h N_x^2 \frac{dx}{b_x} \quad (5.23)$$

де h - висота паза, заповнена провідниками.

Попередньо помноживши і поділивши (5.23) на повну кількість провідників в пази N_n^2 , потім підставивши (5.20), отримаємо індуктивність від потоку пазового розсіювання на одиницю довжини паза

$$L'_{\sigma n} = \mu_0 \cdot N_n^2 \int_0^h \left(\frac{N_x}{N_n} \right)^2 \cdot \frac{dx}{b_x} \quad (5.24)$$

Далі вводять поняття провідності потоку розсіювання паза і визначають її величину виразом

$$\lambda_n = \int_0^h \left(\frac{N_x}{N_n} \right)^2 \cdot \frac{dx}{b_x} \quad (5.25)$$

Скориставшись залежностями

$$N_n = 2am / z \quad (5.26)$$

і

$$z = 2pmq \quad (5.27)$$

з урахуванням (5.26), (5.27) і (5.25), які підставляють в (5.24), а потім в (5.19) отримують остаточний вираз для індуктивного опору від потоків пазового розсіювання

$$X_{\sigma n} = 4\pi \cdot \mu \cdot f \cdot \frac{w^2}{q \cdot p} l_{\delta} \cdot \lambda_n \quad (5.28)$$

За винятком λ_n всі вхідні величини, у (5.28) відомі з попередніх стадій проектування. Тому подальше завдання полягає у визначенні пазової провідності потоків розсіювання (або пазової провідності).

Пазова провідність залежить від форми паза, наповненості паза провідниками і скорочення кроку обмотки. Для прямокутних пазів зазвичай заміняють (5.25) на

$$\lambda_n = \int_0^h \left(\frac{h_x}{h_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} \quad (5.29)$$

В разі змінного перерізу паза по висоті використовують

$$\lambda_n = \int_0^h \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} \quad (5.30)$$

Нижче наведені приклади обчислення λ_n . Для паза на рис. 5.12 зручніше скористатися виразом (5.29), тоді маємо

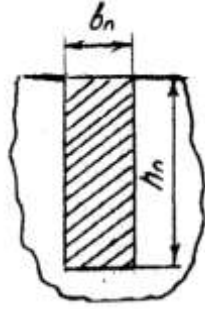


Рис. 5.12.

$$\lambda_n = \int_0^h \left(\frac{h_x}{h_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} = \frac{h_x^3}{3 \cdot h_n \cdot b_n} \Big|_0^h = \frac{1}{3} \frac{h_n}{b_n} \quad (5.31)$$

Для паза на рис. 5.13 величину магнітної провідності паза слід знаходити як суму провідностей

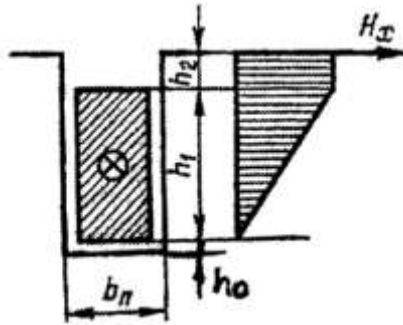


Рис. 5.13.

$$\lambda_n = \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = \int_0^{h_0} \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} + \int_0^{h_{n1}} \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} + \int_0^{h_{n2}} \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} =$$

$$\int_0^{h_0} \left(\frac{0}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} + \int_0^{h_{n1}} \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} + \int_0^{h_{n2}} \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{bn} = \frac{1}{3} \frac{h_{n1}}{b_n} + \frac{h_2}{b_n} \quad (5.32)$$

де під S_x розуміють площу паза, зайнята провідниками на висоті h_x від дна паза.

Напівзакритий паз на рис. 5.14 має пазову провідність

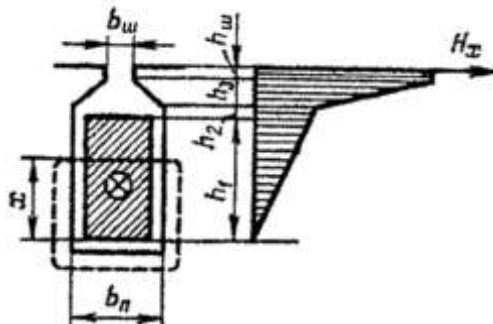


Рис. 5.14.

$$\lambda_n = \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} + \frac{3h_3}{b_n + 2b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \quad (5.33)$$

На рис. 5.15 наведено форми пазів якорів з всіпною обмоткою для машин змінного і постійного струмів.

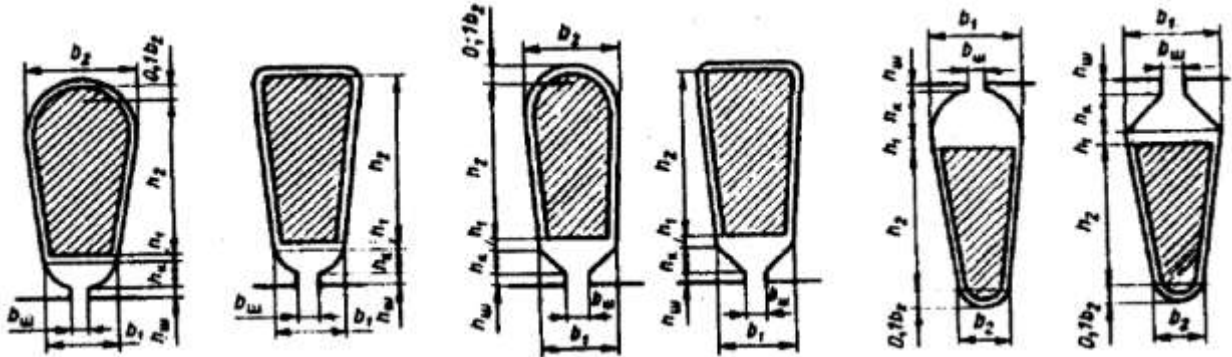


Рис. 5.15. – Форми пазів статора

На рис. 5.16 наведені пази К.З. обмоток асинхронних машин.

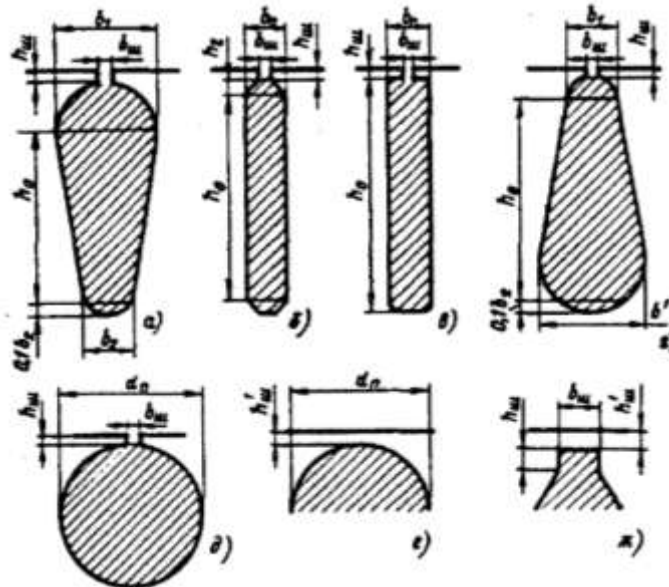


Рис. 5.16. – Форми пазів ротору

Для кожної з наведених форм пазів представлені вирази для пазової провідності, що не вимагають від проектанта електричної машини обчислювати інтеграл (5.25).

Пазова провідність відкритих або напіввідкритих пазів жорстких і стрижневих обмоток враховує наявність міжшарової ізоляції h_0 і наявність або відсутність скорочення кроку обмотки по пазах.

Наприклад, вирази пазової провідності двохшарової обмотки з діаметральним кроком ($y = \tau$). Для пазу на рис. 5.17 при наявності h_0 величину магнітної провідності паза слід знаходити як суму провідностей:

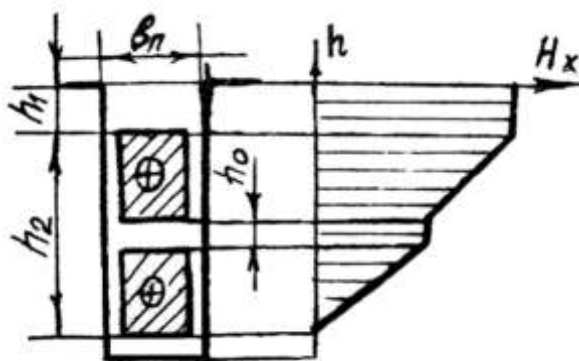


Рис. 5.17.

$$\lambda_n = \frac{h_2 - h_0}{3 \cdot b_n} + \frac{h_1}{b_n} + \frac{h_0}{4 \cdot b_n} \quad (5.34)$$

Величину h_0 приймають рівним нулю при $h_0 \leq 0.5 \text{ мм}$. При $h_0 = 0$ вирази (5.34) і (5.32) збігаються.

Аналогічно для напівзакритого пазу (як на рис. 5.18) і у випадку $y = \tau$, λ_n має вигляд

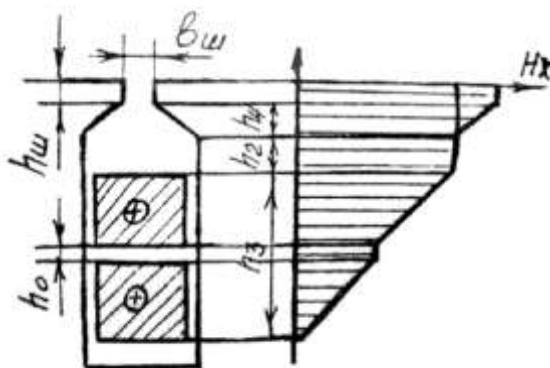


Рис. 5.18.

$$\lambda_n = \frac{h_3 - h_0}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} + \frac{3h_1}{b_n + 2b_w} + \frac{h_w}{b_w} \quad (5.35)$$

значення якого збігається з (5.33) якщо $h_0 = 0$ ($h_0 < 0.5 \text{ мм}$).

В одношарових обмотках і обмотках з $y = \tau$ в обох сторонах котушок, розташованих у одному і тому ж пази, протікають однакові струми. МРС всіх провідників додаються.

У двошарових обмотках з укороченим або подовженим кроком ($y/\tau = \beta < 1$) в частині пазів знаходяться сторони котушок різних фаз і струми в цих сторонах відрізняються за величиною. В результаті сумарне потокозчеплення паза таких обмоток знижується в порівнянні з обмоткою при $y = \tau$ (діаметральний крок), а значить, провідність λ_n обмоток при $y = \tau$ зменшується.

Це враховується коефіцієнтами k_β і k'_β , а вираз для провідності (5.34) приймає вигляд

$$\lambda_n = \frac{h_2 - h_0}{3 \cdot b_n} k_\beta + \frac{h_1}{b_n} k'_\beta + \frac{h_0}{4 \cdot b_n} \quad (5.36)$$

а вираз (5.35)

$$\lambda_n = \frac{h_3 - h_0}{3b_n} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_n} + \frac{3h_1}{b_n + 2b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) k'_\beta \quad (5.37)$$

де при $\frac{2}{3} \leq (\beta = \frac{y}{\tau}) < 1$ приймають

$$\begin{cases} k'_\beta = 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta), \\ k_\beta = 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_\beta), \end{cases}$$

а при $\frac{1}{3} \leq (\beta = \frac{y}{\tau}) \leq \frac{2}{3}$

$$\begin{cases} k'_\beta = 0.25 \cdot (b_\beta - 1), \\ k_\beta = 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_\beta). \end{cases}$$

Наведені вирази дозволяють визначити λ_n і X_{on} для всіх найбільш типових форм і заповнень провідниками пазів.

5.4.2. Вплив ефекту витиснення на індуктивний опір пазу від потоку розсіювання

Ефект витиснення призводить до нерівномірного розподілу густини струму у провідниках пазу. В провідниках, ближче розташованих до повітряному зазору, густина вище, а до дна паза - нижче. Це призводить до порушення умов, за яких отримано вираз (5.28) і (5.25). Зокрема, воно призводить до зменшення провідників N_x , мають одну і ту ж саму густини струму. В результаті магнітна провідність λ_n зменшується у порівнянні з відсутністю ефекту витиснення.

Вплив ефекту витиснення на λ_n і x_{on} враховується коефіцієнтом, який менше або дорівнює одиниці

$$k_x = \frac{L_{on}}{L_{on}} = \frac{1}{m^2} \varphi_1(\xi) + \frac{m^2 - 1}{m^2} \psi_1(\xi) \quad (5.38)$$

$$\varphi_1(\xi) = \frac{3}{2\xi} \frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi} - \text{функція, що враховує вплив поля власного струму};$$

$$\psi_1(\xi) = \frac{1}{\xi} \frac{sh\xi - \sin \xi}{ch\xi + \cos \xi} - \text{функція, що враховує вплив полів від струмів поруч розташований провідників};$$

ваних провідників;

$\xi = \alpha \cdot h$ - приведена висота пазу провідника висотою h ,

α і m - відповідно коефіцієнт приведення і кількість провідників по висоті паза, визначається з (5.22) і рис. 5.3.

Функції $\varphi_1(\xi)$ і $\psi_1(\xi)$ зручніше знаходити за графіками на рис. 5.19.

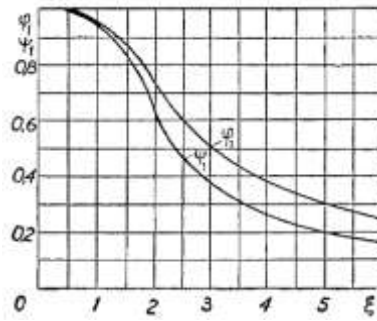


Рис. 5.19.

Особливо слід зазначити, що обчислений коефіцієнт k_x множиться на той доданок у виразі λ_n , в якому враховується висота провідників паза. Наприклад, для паза на рис. 5.13, пазова провідність з урахуванням впливу ефекту витиснення приймає вид

$$\lambda_n = \frac{h_1}{3b_n} k_x = \frac{h_2}{b_n} \quad (5.39)$$

яке приймають при розрахунку $x_{\sigma n}$ (5.28).

5.4.3. Магнітна провідність по коронкам зубців

У синхронних машинах великої потужності крім потоку розсіювання між стінками паза має місце потік розсіювання по коронкам зубців (рис. 5.20).

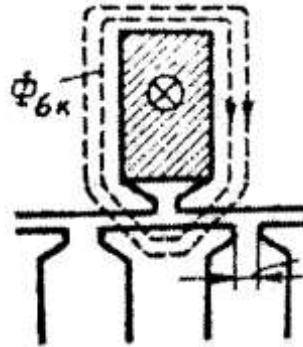


Рис. 5.20. – Розсіювання по коронкам зубців

Магнітна провідність від цього потоку $\Phi_{\sigma k}$ визначають виразом

$$\lambda_k = \left[\alpha \cdot \lambda'_k + \left(0.22 + 0.32 - \sqrt{\frac{t_1 - b_{u1}}{b_{u1}}} \right) \cdot (1 - \alpha) \right] \cdot k'_\beta \quad (5.40)$$

де λ'_k визначають по рис. 5.21; $\alpha = b_n / \tau$ - коефіцієнт полюсного перекриття, b_n - довжина дуги порожнинного наконечника, t_1 - зубцевий крок статора, b_{u1} - відкриття (шліц) паза статора, k'_β - коефіцієнт з виразу (5.37).

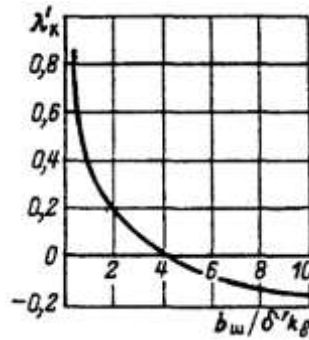


Рис. 5.21. - Величина λ'_k

Величина λ'_k залежить від співвідношення $b_{w1}/(\delta' \cdot K_\delta)$, де δ' усереднена величина повітряного проміжку при збільшеному проміжку під краєм полюсного наконечника. негативна величина λ'_k обумовлена відхиленням силових ліній (викривленням) в порівнянні з прямолінійним законом їх розподілу, що було прийнято при виведенні виразу для пазової провідності λ_n . Величину пазової провідності λ_n , раніш обчислену, складають з величиною провідності по коронках зубців λ_k . Їх суму використовують при обчисленнях (5.28).

5.4.4. Індуктивний опір диференціального розсіювання

Під магнітним струмом диференціального розсіювання розуміють різницю між повним потоком в повітряному проміжку і потоком першої гармоніки, тобто основним. При цьому враховуються тільки ті потоки, які створюють ЕРС розсіювання основної частоти.

Існує кілька теоретичних методів визначення індуктивного опору, від потоків диференціального розсіювання. Вони відрізняються складністю, тому на практиці користуються для розрахунку таким же виразом, як і для індуктивного опору, від потоків розсіювання пазів (5.28), але замість пазової провідності λ_n підставляють магнітну провідність диференціального розсіювання λ_δ .

Розрахунок магнітної провідності здійснюють за емпіричними виразами.

Для асинхронних машин [2]

$$\lambda_\delta = \xi \frac{t}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \quad (5.41)$$

де ξ - коефіцієнт, що залежить від числа пазів на полюс і фазу, кроку обмотки і співвідношення в b_w/δ , [2]; δ - повітряний проміжок, k_δ - коефіцієнт Картера.

Для синхронних машин

$$\lambda_\delta = 0,03 \frac{\tau \cdot \alpha_\delta}{\delta' k_\delta q_1} \quad (5.42)$$

де τ - полюсна поділлка; α_δ - коефіцієнт полюсного перекриття, δ' - величина усередненого повітряного проміжку під полюсами, k_δ - коефіцієнт Картера; q_1 - число пазів на полюс і фазу обмотки статора.

5.4.5. Індуктивний опір лобового розсіювання

Індуктивний опір, обумовлений потоком лобового розсіювання, знаходять, використовуючи (5.28), де замість λ_n підставляють провідність лобового розсіювання λ_l .

Спрощена картина магнітного потоку лобового розсіювання наведена на рис. 5.22 і рис. 5.23, з яких випливає,

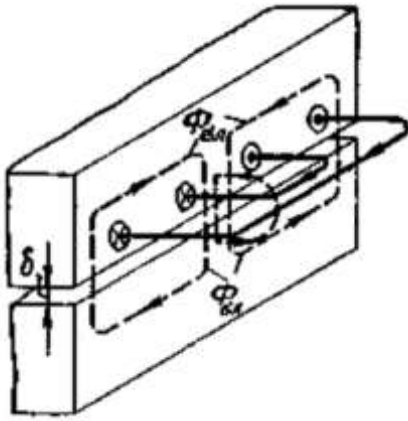


Рис. 5.22.

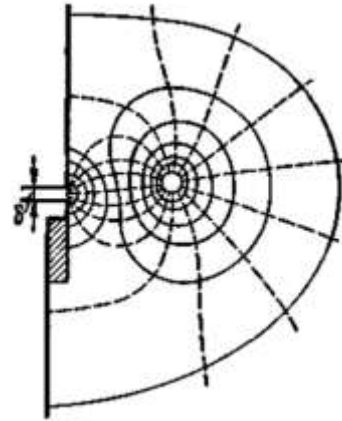


Рис. 5.23.

що магнітний потік розсіювання (і, отже, λ_l) залежить від:

- довжини і відгину лобових частин,
- типу і числа пазів на полюс і фазу,
- розмірів і конструктивного розташування магнітопровідних деталей і вузлів в торцевих (лобових) частинах машини.

Через складність картини полів розсіювання в лобових частинах обчислення магнітної провідності для них здійснюють за допомогою емпіричних формул. Так для машин невеликої і середньої потужності в [2] рекомендують вираз

$$\lambda_l = 0.34 \frac{q}{l_\delta} (l_l - 0.64\beta \cdot \tau) \quad (5.43)$$

а для машин великих потужностей [1] рекомендують визначати

$$\lambda_l = k_l \cdot \frac{\tau}{l_\delta} \cdot q \quad (5.44)$$

Коефіцієнт лобових частин k_l залежить від типу обмотки:

$k_l = 0.45$ - для одношарових обмоток в розвалку;

$k_l = 0.57 \dots 0.6$ - для двошарових обмоток;

$k_l = 1$ - для корзинчатих концентричних обмоток.

5.4.6. Індуктивний опір від потоків розсіювання

Наведені вище вирази для пазового, диференціального та лобового складових потоків розсіювання обмотки дозволяють визначити для статора і ротора загальний індуктивний опір, що характеризує потік розсіювання кожної з обмоток, використо-

вуючи вираз (5.28)

$$X_{\sigma 1(2)} = 4\pi \mu_0 \cdot f_1 l_\delta \frac{w_{1(2)}^2}{p \cdot q_{1(2)}} (\lambda_{n1(2)} + \lambda_{g1(2)} + \lambda_{r1(2)}) \quad (5.45)$$

де цифра 1- для обмоток якорів (статора в асинхронній машині), цифра 2- для обмоток фазного і короткозамкнутого роторів асинхронних машин.

Зауважимо, що для великих машин в λ_{n1} входить сума провідностей пазового розсіювання і розсіювання по коронкам зубців.

5.4.7. Узагальнений аналіз параметрів електричних машин

Перш за все, слід зазначити, що у відносних одиницях (в.о.) параметри машин і трансформаторів змінюються в невеликих межах у порівнянні їх в абсолютних одиницях. Подання параметрів в в.о. дозволяє якісно оцінити і експлуатаційні властивості: ККД, $\cos\varphi$, ковзання та інше.

Нижче наведені приклади числових величин опорів у в.о.

Активні опори якорів лежать в межах $r_{1(a)}^* = 0,05 \dots 0,005$.

Індуктивний опір взаємоіндукції для електричних машин і трансформаторів:

$X_m^* = 50 \dots 100$ - для трансформаторів,

$X_m^* = 2 \dots 4,0$ - для асинхронних машин,

$X_{ad}^* = 0,6 \dots 1,8$ - по поздовжній осі для явнополюсних синхронних машин,

$X_{aq}^* = 0,3 \dots 1,4$ - по поперечної осі для явнополюсних синхронних машин.

Індуктивний опір розсіювання має величину у межах:

$X_\sigma^* = 0,1 \dots 0,15$.

Слід зазначити, що X_σ^* для сталих режимів позначають для статора X_1^* , а для ротора синхронних машин $X_{\sigma 2}^*$ та X_2^* .

У процесі проектування дуже важливо розуміти вплив електромагнітних навантажень на параметри, тому що параметри визначають експлуатаційні властивості машин і трансформаторів.

На рис. 5.24 наведені зв'язки параметрів активних і реактивних опорів машин і трансформаторів з урахуванням їх даних.

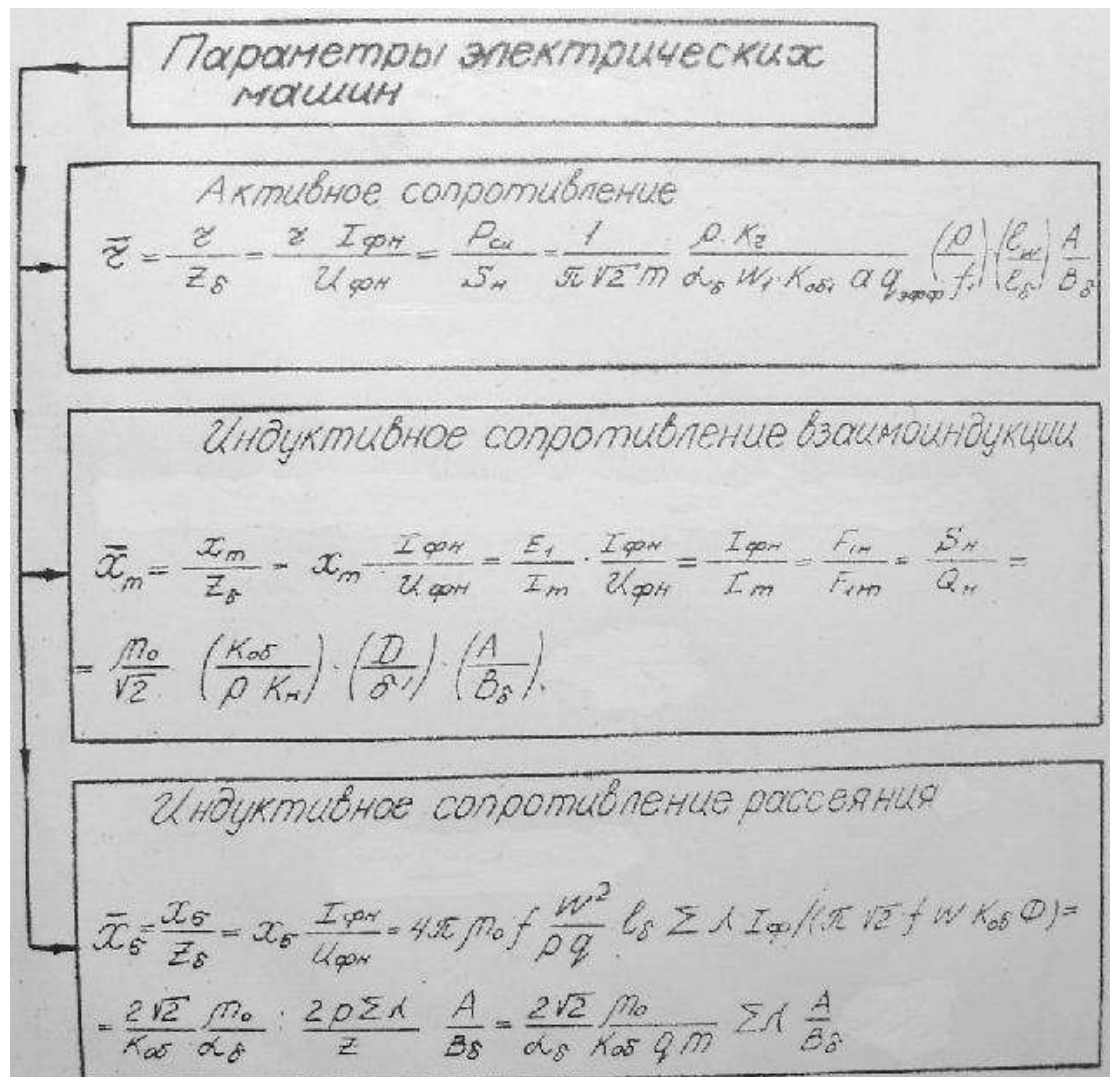


Рис. 5.24. – Зв'язок параметрів ЕМ і трансформаторів

Для скорочення викладень на рис. 5.24 наведені остаточні вирази, з яких випливає важливий висновок:

$$r^*, x^* \equiv \frac{A}{B_{\delta}} \quad (5.46)$$

При варіаціях A і B у процесі проектування необхідно враховувати (5.46).

5.4.8. Параметри к.з. обмоток

Під параметрами к.з. обмоток розуміють:

r_2 – активний опір фази ротора;

x_2 – реактивно-індуктивний опір розсіювання фази ротора.

Активний опір фази ротора включає:

- активний опір стержня клітки;
- активний опір кільця клітки.

Особливу увагу необхідно звернути на те, що число фаз к.з. ротора приймають рівним числу стержнів (пазів) z_2 , тобто $m_2 = z_2$, а число витків в фазі 0,5, тобто $w_2 = 0,5$.

Реальні активні опори для фази ротора визначають:

- для стержня

$$r_{cm} = \rho_{cm} \cdot \frac{l_{cm}}{q_c} \cdot k_r \quad (5.47)$$

- для частини К.З. кільця клітки

$$r_k = \rho_k \cdot \frac{\pi \cdot D_{к.ср}}{z_2 \cdot q_k} \quad (5.48)$$

де ρ_{cm}, ρ_k – питомі електричні опори відповідно для стержня та к.з. кільця; l_{cm} – довжина стержня між К.З. кільцями; q_c – переріз стержня; q_k – переріз К.З. кільця; k_r – коефіцієнт, що враховує ефект витиснення (при робочих частотах обертання $k_r \approx 1$); $D_{к.ср}$ – середній діаметр кільця К.З. обмотки; z_2 – кількість пазів на роторі.

Сума опорів $r_{cm} + r_k$ є істинним активним опором фази К.З. обмотки ротора. Безпосереднє використання цього сумарного активного опору для розрахунків експлуатаційних показників досить складно, враховуючи необхідність приведення параметрів К.З. обмотки ротора до витків обмотки статора. Для виконання можливості приведення параметрів використовують еквівалентний активний опір r_2 , виходячи з умови збереження величини втрат (закон збереження енергії) на еквівалентному активному опорі (або розрахунку) r_2 такими, які дорівнюють реальним втратам у стержні і кільці.

Цю рівність записують

$$I_2^2 \cdot r_2 = I_{cm}^2 \cdot r_{cm} + 2 \cdot I_k^2 \cdot r_k \quad (5.49)$$

де I_2 – фіктивний результуючий струм фази ротора; I_{cm} – реальний струм в стержні К.З. обмотки; I_k – реальний струм в кільці К.З. обмотки.

Використовуючи векторний розподіл струмів в стержнях і кільцях к.з. клітки (рис. 5.25), знаходять

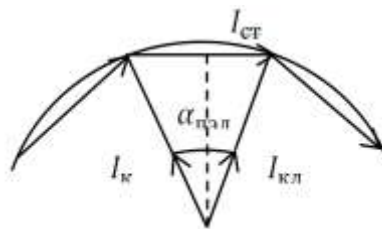


Рис. 5.25.

$$I_k = I_{cm} / (2 \sin \frac{\pi \cdot p}{z_2} I_k) = I_{cm} / \Delta \quad (5.50)$$

де $\alpha_{пэл} = \frac{2\pi \cdot p}{z_2}$ - зсув між пазами,

$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{z_2}$ - коефіцієнт приведення струму кільця.

Підставивши (5.50) в (5.49) і прийнявши $I_2 = I_{cm}$ отримують

$$r_2 = r_{cm} + 2 \cdot \frac{r_k}{\Delta^2} \quad (5.51)$$

Використовуючи загальне вираз для коефіцієнта приведення

$$k = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 \cdot k_{обм1}}{w_2 \cdot k_{обм2}} \right)^2 \quad (5.52)$$

і рівності $m_2 = z_2$, $w_2 = 0,5$, $k_{обм2} = k_{ск2}$

отримують для к.з. обмотки ротора коефіцієнт приведення.

$$k = \frac{4m_1(w_1 \cdot k_{обм1})^2}{z_2 \cdot k_{ск2}} \quad (5.53)$$

Індуктивний опір розсіювання фази ротора визначають за раніше отриманою формулою

$$x_2 = 4\pi \mu_0 \frac{w^2}{p \cdot q} \cdot l_\delta \cdot \sum x_2 = 15,8 \cdot \frac{t_1}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \sum x_2 \quad (5.54)$$

або спрощеній, враховуючи $m_2 = z_2$, $q = 1/(2p)$

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot 10^{-6} (\lambda_{n2} + \lambda_{g2} + \lambda_{л2}) \quad (5.55)$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання λ_{n2} знаходять по тим же виразам, що і для статора (з урахуванням форми пазів, формули наведені в [1, 2]).

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання фази К.З. обмотки ротора знаходять

$$\lambda_{g2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi \quad (5.56)$$

де

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{z_2} \right)^2} \quad (5.57)$$

$\Delta_z = f\left(\frac{b_{ш}}{\delta}; \frac{b_{ш}}{t}\right)$ – коефіцієнт, обумовлений з [2].

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання для литих обмоток з прилеглими К.З. кільцями до торців осердя ротора знаходять за формулою

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 D_{к.ср.}}{z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 D_{к.ср.}}{2a_k + b_k} \quad (5.58)$$

для замикаючих кілець віддалених від торців осердя,

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{к.ср.}}{z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7D_{к.ср.}}{2(a_k + b_k)} \quad (5.59)$$

де $D_{к.ср.}$ – середній діаметр К.З. кільця; $\Delta = 2 \sin(\pi p / z_2)$ – коефіцієнт приведення струмів у кільці до струму у стержні; a_k і b_k – середні висота та ширина кільця; $l'_\delta = l_\delta - 0,5b_k \cdot n_k$ – розрахункова довжина ротору; b_k і n_k – ширина і кількість радіальних каналів.

Розрахункову величину індуктивного опору x_2 приводять до витків обмотки статора, використовуючи

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4m_1(w_1 \cdot k_{обм1})^2}{z_2 \cdot k_{ск2}} \quad (5.60)$$

РОЗДІЛ № 6. ВЕНТИЛЯЦІЙНІ РОЗРАХУНКИ

6.1. Загальні відомості

У загальному випадку вентиляція - регульований повітрообмін, що здійснюється для охолодження електричних машин. Окрім повітря можуть використовуватися і інші гази (наприклад, водень).

Повітрообмін (або інших газів) забезпечує вентилятор - пристрій для подачі повітря (або газів) під тиском в певних напрямках до охолоджуючих поверхонь.

Кінцевою метою вентиляційних розрахунків є визначення швидкостей руху газів над поверхнями (охолоджуючими або нагріваючими), що дозволяє в тепловому розрахунку визначити коефіцієнт теплопередачі (тепловіддача) з поверхні. Надалі розглядається тільки конвекційний спосіб теплопередачі.

Якщо тепловий розрахунок дає незадовільні результати, то необхідно здійснити відповідні зміни в системі вентиляції і повторити всі розрахунки.

Класифікація систем вентиляції приведена на рис. 6.1.



Рис. 6.1. - Класифікація систем вентиляції

Вентиляція може бути природною або штучною. При природній вентиляції, як правило, переміщення повітря, або повітрообмін, здійснюється за рахунок різниці питомих мас гарячого і холодного повітря.

Природна вентиляція застосовується: в мікромашинах, де зовнішню поверхню виконують гладкою; в електричних машинах потужністю до 1 кВт; в електричних машинах потужністю більше 1 кВт відкритих і з відносно невеликими електромагнітними навантаженнями. В таких машинах тепловіддача здійснюється випромінюванням і природною конвекцією.

Як впливає з теорії геометрично подібного ряду електричних машин тепловий потік (Bm / m^2) зростає із зростанням потужності:

$$q \sim \sqrt[4]{S_{эм}} \quad (6.1)$$

Зростання величини теплового потоку примушує інтенсифікувати відведення тепла з метою зниження перевищення температури між охолоджуючою поверхнею і охолоджуючим газом, що, зрештою, зменшує перегрів окремих конструктивних частин машини (наприклад, обмоток) над навколишнім середовищем. Це досягається за допомогою штучної системи вентиляції.

У свою чергу штучну систему вентиляції ділять на: самовентиляцію і незалежну вентиляцію.

Під самовентиляцією розуміють систему, при якій повітрообмін над поверхнями активних частин всередині машини, а також між зовнішніми поверхнями здійснюється за рахунок вентилятора або інших конструктивних елементів, що розташовуються на валу або роторі самої машини.

Незалежна система вентиляції забезпечується вентилятором, який приводиться в обертання двигуном, що має незалежне живлення і частоту обертання, не пов'язану з частотою обертання ротора охолоджуваної машини. Такий пристрій розташовують або безпосередньо на корпусі машини (такий вентилятор іноді називають «наїзник»), або окремо (іноді у формі равлика).

Система самовентиляції дозволяє отримати більш компактну, дешеву і просту в експлуатації конструкцію електричної машини. Вона застосовується в нерегульованих по частоті обертання електроприводах.

Незалежна система вентиляції обов'язково повинна застосовуватися в регульованих електроприводах і у випадках необхідності відокремлення повітря ззовні електричних машин, що обумовлюється вимогами до умов експлуатації.

Залежно від напрямку повітрообміну у машинах в обох системах розрізняють вентиляцію: витяжну і нагнітальну.

Витяжна вентиляція для системи самовентиляції приведена на рис. 6.2, а для незалежної – на рис. 6.3.

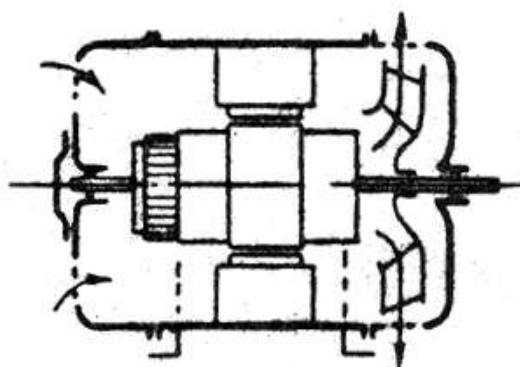


Рис. 6.2. - Самовентиляція

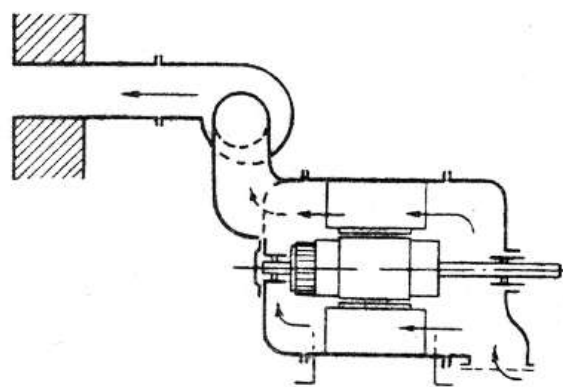


Рис. 6.3. - Незалежна вентиляція

Нагнітальна вентиляція для системи самовентиляції приведена на рис. 6.4, а для незалежної - на рис. 6.5.

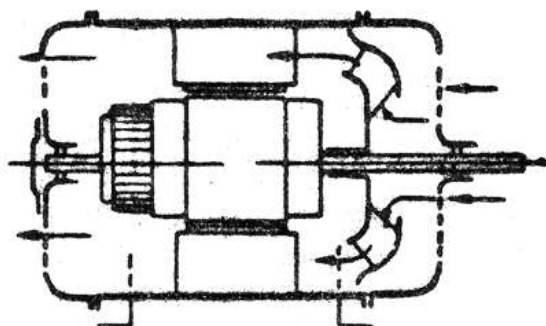


Рис. 6.4. - Нагнітальна вентиляція

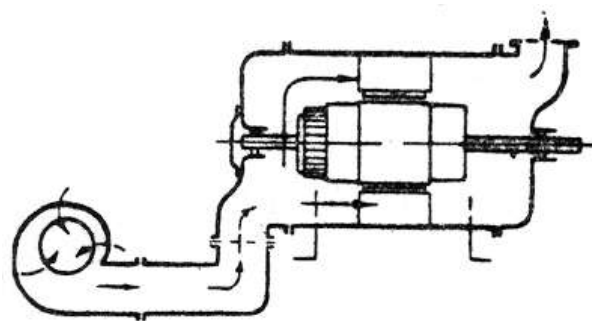


Рис. 6.5. - Незалежна для самовентиляції

Вибір витяжної або нагнітальної систем вентиляції залежить від конкретних умов. Наприклад, перевагою витяжної системи є те, що в машину поступає холодне повітря навколишнього середовища, а недоліком - пил від зносу щіток (рис. 6.2) потрапляє всередину машини. Цей недолік усунений на рис. 6.3. У нагнітальній системі вентилятор на $(2...3)^{\circ}\text{C}$ підігріває повітря, яке поступає з навколишнього середо-

вища, що примушує збільшити витрату повітря для охолодження на (10...15)%, а це вимагає збільшення габаритів вентилятора і потужності вентиляційних втрат. У витяжній системі цей недолік відсутній.

По розташуванню охолоджуваних поверхонь розрізняють вентиляції: зовнішню (рис. 6.6) і внутрішню (рис. 6.7).

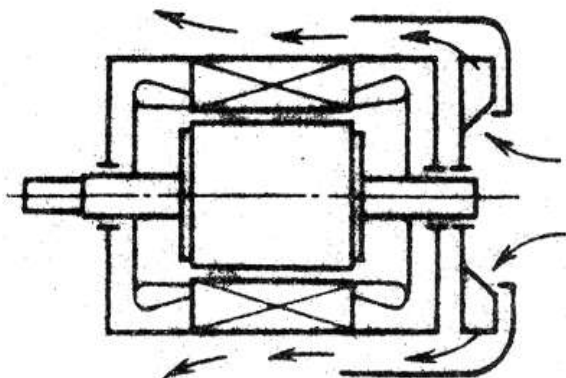


Рис. 6.6. - Зовнішня вентиляція

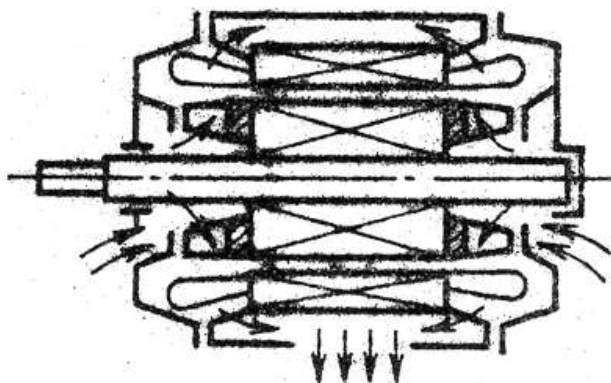


Рис. 6.7. - Внутрішня вентиляція

По напрямку повітрообміну відносно осі вала розрізняють вентиляції: аксіальну (рис. 6.8), радіальну (рис. 6.9), аксіально-радіальну (потужні турбогенератори).

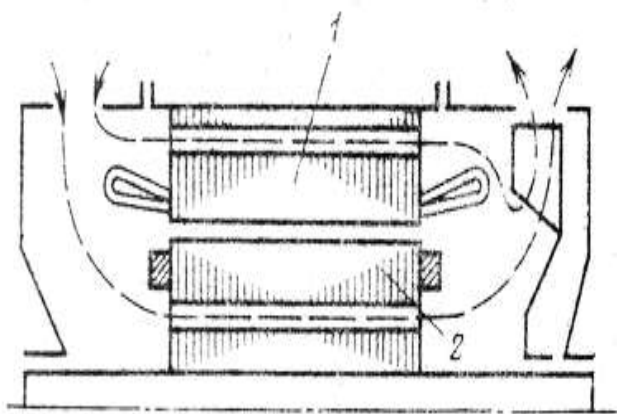


Рис. 6.8. - Аксіальна вентиляція

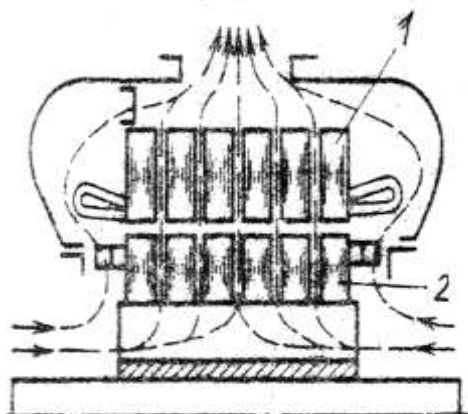


Рис. 6.9. - Радіальна вентиляція

Розрізняють радіальну вентиляцію: узгоджену і зустрічну. При узгодженій вентиляції повітря рухається по радіусу від центру вала до периферії, а при зустрічній радіальній системі - у зворотному напрямі.

Рух охолоджуючого повітря (а в загальному випадку - охолоджуючого агента) може здійснюватися по розімкненому циклу або замкнутому циклу. Розімкнений цикл вентиляції показаний на рис. 6.2, рис. 6.3, рис. 6.4, рис. 6.5, рис. 6.6. Замкнутий цикл вентиляції показаний на рис. 6.10 для закритих машин великої потужності, де для компенсації витоку повітря з системи використовують поповнення його у точці атмосфери F.

На практиці розімкнений цикл використовують у машинах із ступенем IP23 і нижче. В машинах із ступенем захисту IP44 і вище використовують зовнішню розімкнену і внутрішню замкнуту вентиляцію (рис. 6.11).

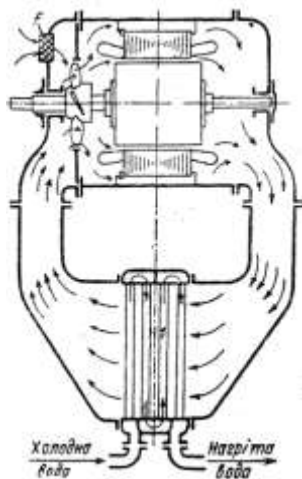


Рис. 6.10. - Замкнута вентиляція

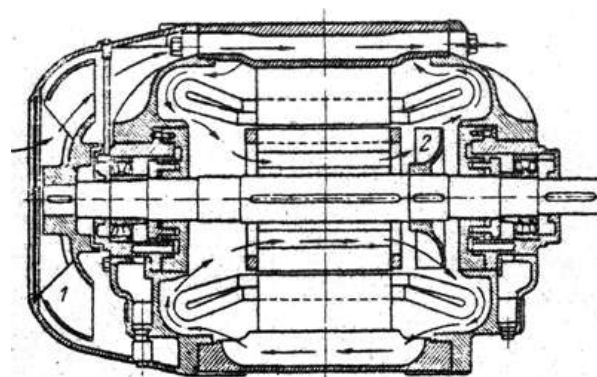


Рис. 6.11. - Внутрішня вентиляція

На завершення слід зазначити, що вибір системи вентиляції впливає на конструкцію електричної машини, її теплову міцність і експлуатаційні властивості.

6.2. Зв'язок системи вентиляції і конструкції електричних машин

Багатий досвід проектування і електромашинобудування дає рекомендації по вибору конструкцій найпоширеніших електричних машин і відповідної системи вентиляції. Нижче розглядаються найпоширеніші випадки.

Аксіальна вентиляція (рис. 6.8) застосовується у основному в машинах середньої потужності. Вона реалізується за допомогою аксіальних каналів, що вимагає штамповки у листах статора (рис. 6.12) і ротора (рис. 6.13) отворів.

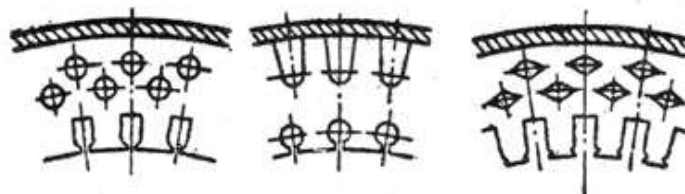


Рис. 6.12. - Шихтовка листів статора



Рис. 6.13. - Шихтовка листів ротора

Аксіальні канали виконують в якорях машин постійного струму при співвідношеннях довжини якоря L_a до його зовнішнього діаметра $D_a - L_a / D_a \approx 1,0 \dots 1,2$ при $D_a \leq 200 \text{ мм}$.

Із зростанням діаметру ротора це співвідношення знижується: $L_a / D_a \approx 0,5$ при $D_a \leq 840 \text{ мм}$.

Аксіальні канали застосовані в роторах асинхронних двигунів серій 4А і АІ з

висотою осі обертання $h \geq 280 \text{ мм}$.

Аксіальна вентиляція вимагає присутності вентилятора, який створює напір (тиск) і вимушує переміщати повітря (повітрообмін) у аксіальних каналах і міжполюсному просторі явнополюсних машин.

Радіальну систему вентиляції (рис. 6.9) застосовують для машин великих потужностей (починаючи з потужності 400 кВт). В цьому випадку магнітопровід статора і ротора виконують у вигляді пакетів завтовшки 40...80 мм, розділяючи їх каналами шириною $b_k = 10 \text{ мм}$. Канал формують за допомогою розпірок (рис. 6.14).

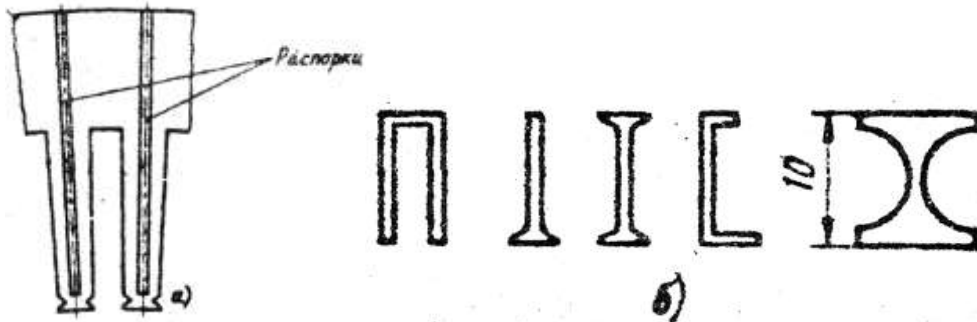


Рис. 6.14. - Пакети статора і ротора з допомогою розпірок: а) лист заліза статора з привареними розпірками, які створюють радіальний канал; б) форма перерізів розпірок.

На практиці в машинах великих потужностей використовують аксіально-радіальні канали системи вентиляції. Прикладом може служити конструкція ротора синхронної явнополюсної машини (рис. 6.15). Тут за рахунок вентиляючої дії полюсів і розпірок (тут їх називають «ветрениці») повітря поступає в міжполюсний простір (вздовж осі валу) ротора. За допомогою «ветрениць» повітря нагнітається в радіальні канали статора, які розташовують напроти каналів ротору.

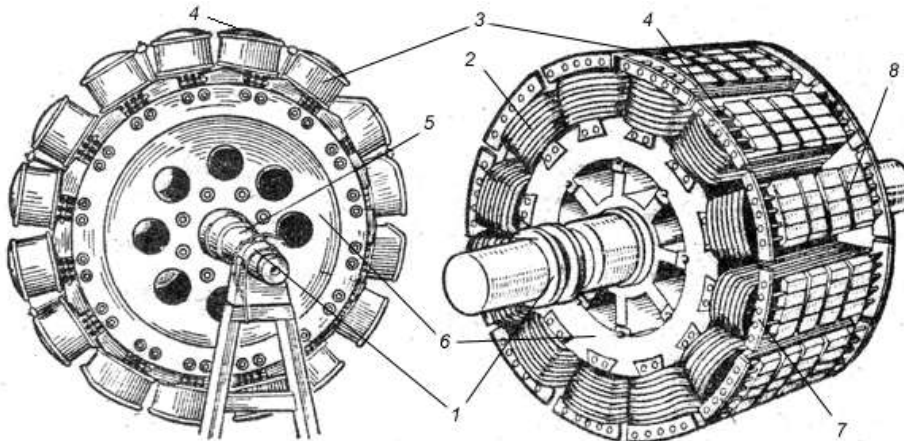


Рис. 6.15. - Канали системи вентиляції для синхронних машин:

1- контактні кільця; 2- обмотка збудження; 3- полюс; 4- полюсний наконечник; 5- вал; 6- магнітне колесо; 7- к.з. обмотка (пускова або заспокійлива); 8- радіальний канал.

В турбогенераторах потужністю 100 МВт і вище використовують в якості охолоджуючого газу водень, який має більш високі теплофізичні властивості, ніж повітря, і застосовують аксіально-радіальну систему вентиляції.

В обмотках статору потужних турбогенераторів провідники частково виконуються порожнистими. Через ці порожнисті провідники проходить водень, охоло-

джуючи обмотку. Пакети магнітопроводу і частково обмотка статора, яка розташована в радіальному каналі, охолоджується воднем, що проходить через радіальні канали.

Слід зазначити, що в турбогенераторах потужністю 200 МВт і вище безпосереднє охолодження провідників може здійснюватися дистильованою водою.

Особливу увагу в турбогенераторі надають вентиляції (а значить і охолодженню) ротора, який знаходиться в гірших умовах по нагріву, ніж статор. В роторах турбогенераторів водень подається з боку лобових частин і, пройшовши по порожнистих провідниках обмотки збудження, викидається в повітряний проміжок (рис. 6.16) і далі поступає в радіальні канали магнітопроводу статора.

В турбогенераторах потужністю 300, 500 і 800 МВт застосовують узгоджено-зустрічну радіальну вентиляцію. Це вимагає формування каналів в пазу за рахунок зсуву нерівних по ширині провідників обмотки збудження (рис. 6.17).

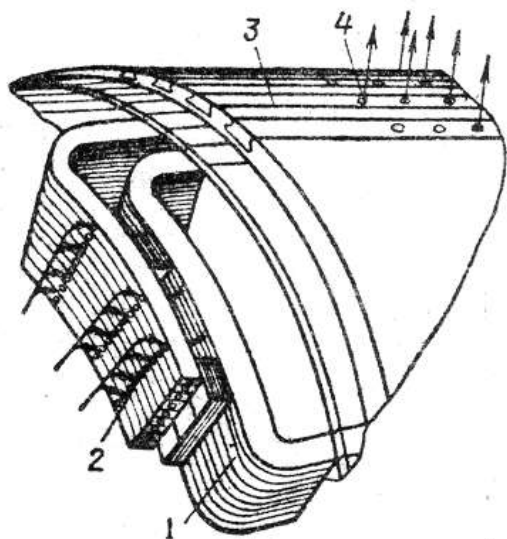


Рис. 6.16. - 1 - лобова частина обмотки збудження; 2 - входи водню в канали провідників; 3 - клин паза ротора; 4 - отвори для виходу нагрітого водню.

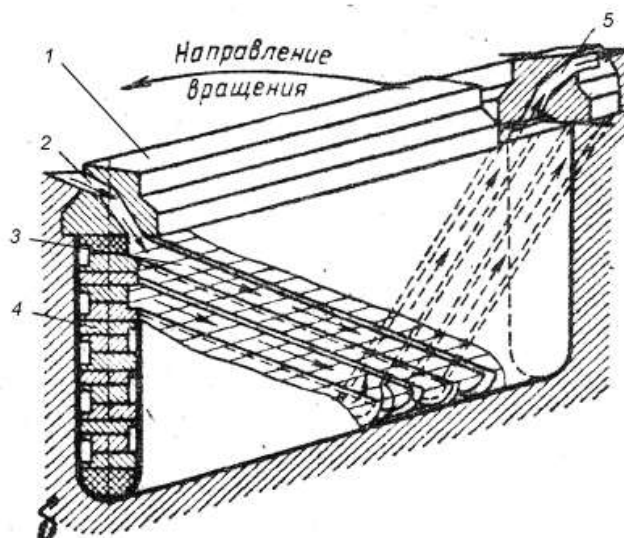


Рис. 6.17. - 1 - клин; 2 - канал водню у клині; 3 - канал в пазу; 4 – суцільний і найбільший по ширині провідник; 5 - канал виходу водню.

З метою підвищення ефективності вентиляції, а значить і поліпшення охолодження, приймають додаткові конструктивні рішення. Наприклад, для поліпшення охолодження обмоток збудження явнополюсних машин виконують їх з радіальними каналами (рис. 6.18)

Застосування додаткових крилець на кінцях обмоток роторів асинхронних машин з фазним ротором і машин постійного струму прискорює повітрообмін в лобових частинах машин із ступенем захисту IP23.

Виконання лопаток, які відливаються разом з к.з. обмоткою ротора (рис. 6.19), також сприяє цьому. А в машинах із ступенем захисту IP44 і IP54 перемішування лопатками повітря в зоні лобових частин дозволяє на (10...15)% підвищити потужність машини в тому ж габариті і припустимому нагріванні.

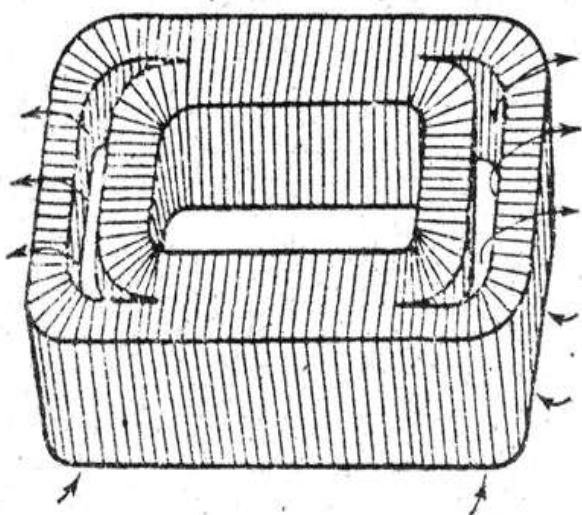


Рис. 6.18. - Радіальні канали охолодження для ЯСМ

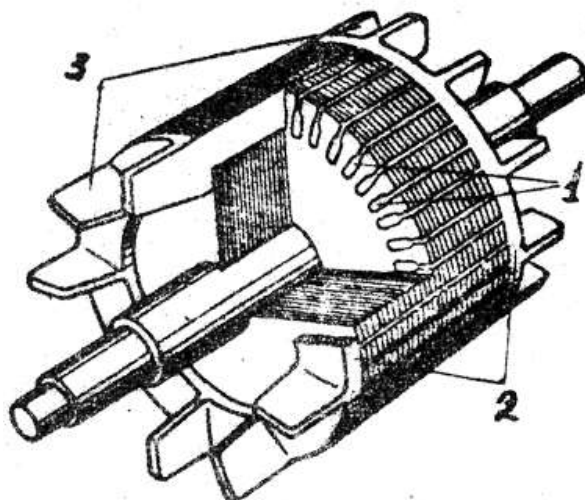


Рис. 6.19. - Виконання лопаток: 1 – стрижні к.з. обмотки; 2 – к.з. кільця; 3 – лопатки.

Розімкнений цикл вентиляції впливає на конструкцію електричної машини. На рис. 6.20 приведений зовнішній вигляд асинхронного двигуна серії 4А з висотою осі обертання $h=180...250\text{мм}$ і ступенем захисту IP23. На рис. 6.21 показаний асинхронний двигун серії 4А для IP23 з висотою обертання $h \geq 280\text{мм}$.

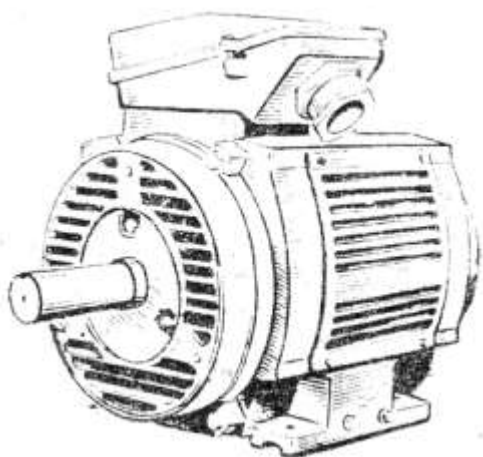


Рис. 6.20. - АМ з $h=180...250\text{мм}$

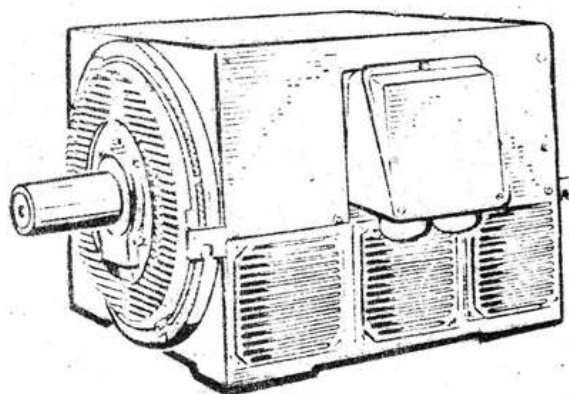


Рис. 6.21. - АМ з $h \geq 280\text{мм}$

Асинхронні двигуни, що обдуваються, серії 4А (рис. 6.22) і АІ (рис. 6.23) з розімкненим зовнішнім циклом вентиляції при ступені захисту IP44 і IP54 виконуються з ребристими станинами. Це дозволяє на (60...80)% підвищити номінальну потужність машин в тому ж габариті при сумісному використуванні внутрішнього замкнутого циклу самовентиляції.

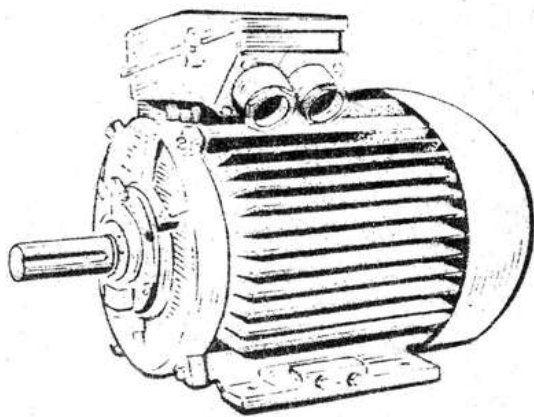


Рис. 6.22. - АМ з IP44

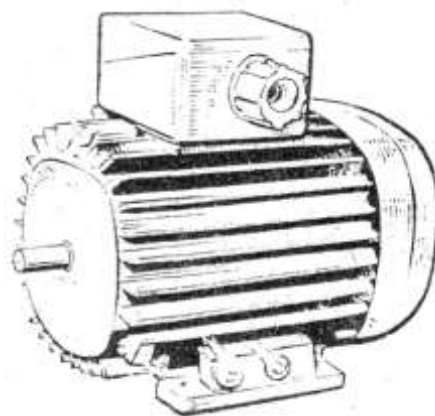


Рис. 6.23. - АМ з IP54

Розглянуті конструктивні рішення, що забезпечують охолодження за допомогою вентиляції, не охоплюють всієї різноманітності, що є на практиці.

Існують і інші способи охолодження, які всі мають позначення ІС (International Cooling) з вказівкою виду охолоджуючого агента, будови кола для його циркуляції та способу переміщення охолоджуючого агента. Приклад позначення показаний на рис. 6.24.

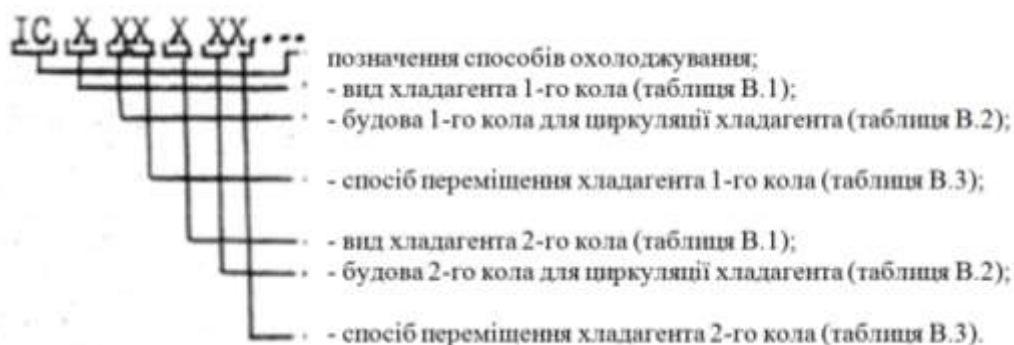


Рис. 6.24. - Позначення способів охолодження

Вживані у системах види охолоджуючих агентів (хладагенти) мають позначення згідно міждержавного стандарту ГОСТ20459-75 і приведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Позначення хладагента

Умовне позначення хладагента	Найменування хладагента	Рід хладагента
A	Повітря	Газ
H	Водень	
N	Азот	
C	Двоокис вуглецю	
Fr	Фреон	
W	Вода	Рідина
V	Масло	
Kr	Гас	

Примітки:

1 Якщо для охолодження машини використовується хладагент, відмінний від вказаного в табл. 6.1, то слід привести його найменування.

2 Якщо у всіх колах охолодження машини хладагентом є повітря, то допускається пропуск букви, що позначає вид хладагента.

3 В даний час фреон заборонений для застосування.

Умовні позначення будови кола для циркуляції хладагента приведені в міждержавному стандарті ГОСТ20459-75, частково ці позначення приведені в табл. 6.2 [2].

Таблица 6.2 – Будова кола охолодження

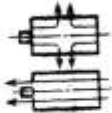
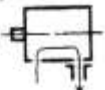
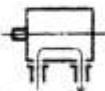
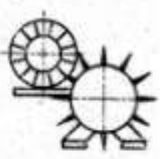
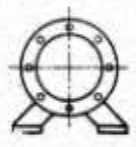
Условное обозначение устройства цепи	Чертеж	Краткая характеристика	Определение
0		Свободная циркуляция	Хладагент свободно подводится к машине из окружающей среды и свободно возвращается в эту среду
I		Охлаждение с помощью подводящей трубы или подводящего канала	Хладагент подводится к машине или охладителю не из окружающей среды, а из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал и затем свободно выходит в окружающую среду
2		Охлаждение с помощью отводящей трубы или отводящего канала	Хладагент свободно подводится из окружающей среды к машине или охладителю и удаляется через отводящую трубу или отводящий канал на некотором расстоянии от среды, окружающей машину
3		Охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб или каналов	Хладагент подводится к машине или охладителю не из окружающей среды, а из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал, а затем удаляется через отводящую трубу или отводящий канал на некотором расстоянии от среды, окружающей машину

Таблица 6.2 – Будова кола охолодження

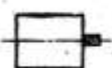
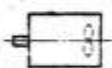
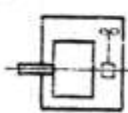
1	2	3	4
4		Охлаждение с помощью наружной поверхности машины (с использованием окружающей среды)	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло через поверхность корпуса вторичному хладагенту, которым является среда, окружающая корпус машины. Поверхность корпуса машины может быть гладкой или ребристой для улучшения теплоотдачи
5		Охлаждение с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды)	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, встроенном в машину и являющемся ее неотъемлемой частью; вторичным хладагентом является среда, окружающая машину
6		Охлаждение с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды)	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, являющемся независимым устройством, установленным непосредственно на машине; вторичным хладагентом является среда, окружающая машину

Примітка. Всього умовних позначень будов кола охолодження 0...9.

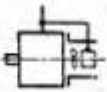
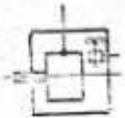
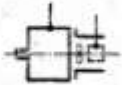
Способи переміщення хладагента мають умовні позначення згідно міждержавному стандарту ГОСТ20459-75. Найпоширеніші способи переміщення приведені в табл. 6.3 [2]

Таблица 6.3 – Способи переміщення хладагента

Таблица 6.3 – Способы перемещения хладагента

Условное обозначение способа перемещения хладагента	Чертеж	Краткое наименование	Определение
I	2	3	4
0		Свободная конвекция	Движение хладагента осуществляется за счет разницы температур; вентилирующее действие ротора машины незначительно
I		Самовентилиция	Движение хладагента осуществляется вентилирующим действием ротора или с помощью специального устройства, расположенного на валу ротора машины
2		Перемещение хладагента с помощью встроенного зависимого устройства	Движение хладагента осуществляется с помощью зависимого встроенного устройства, не смонтированного непосредственно на валу машины, например, внутреннего вентилятора с зубчатой передачей или ременным приводом

Таблиця 6.3 – Способи переміщення хладагента

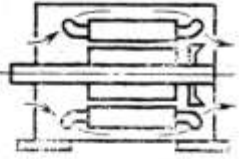
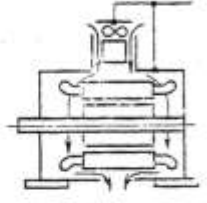
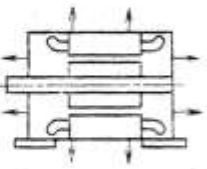
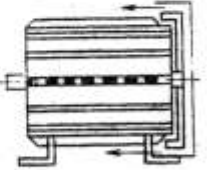
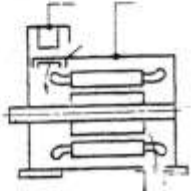
I	2	3	4
3		Перемещение хладагента с помощью пристроенного независимого устройства	Движение хладагента осуществляется с помощью зависимого пристроенного устройства, установленного непосредственно на машине, например, вентилятора, приводимого в движение электрическим двигателем, получающим питание от зажимов охлаждаемой машины
4		Перемещение хладагента с помощью встроенного независимого устройства	Движение хладагента осуществляется с помощью встроенного устройства, которое получает энергию независимо от основной машины, например, внутреннего вентилятора, приводимого в движение электрическим двигателем, питаемым независимо от охлаждаемой машины
5			
6		Перемещение хладагента с помощью пристроенного независимого устройства	Движение хладагента осуществляется с помощью пристроенного устройства, установленного непосредственно на машине и питаемого независимо от охлаждаемой машины

Примітка. Всього умовних позначень способів переміщення хладагента 0...9.

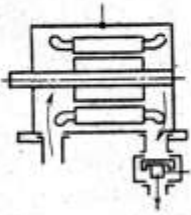
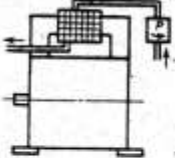
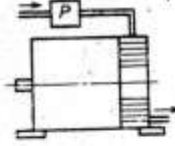
Приклади повного позначення схем охолодження приведені в табл. 6.4 [2] для найпоширеніших випадків.

Таблиця 6.4 – Позначення схем охолодження реальних машин

Таблица 6.4 – Позначення схем охолодження реальних машин

Характеристика охлад- ждения машины	Схема охлаждения	Обозначение
1	2	3
1. Защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины		IC 01
2. Защищенная машина, охлаждаемая пристроенным вентилятором; приводной электродвигатель вентилятора получает питание от зажимов охлаждаемой машины		IC 03
3. Закрытая машина с естественным охлаждением без наружного вентилятора		IC 00 40
4. Закрытая машина с ребристой или гладкой станиной, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины		IC 01 4I
10. Защищенная машина с охлаждением с помощью пристроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины. Воздух из машины поступает в отводящую трубу		IC 26

Таблиця 6.4 – Позначення схем охолодження реальних машин

I	2	3
II. Закрытая машина с подводящей и отводящей трубами; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, установленным на машине		IC 37
I2. Закрытая машина с воздушным охлаждением и встроенным водяным охладителем; циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным насосом или от водопроводной сети		ICW37 A 8I
I3. Закрытая машина с водородным охлаждением и встроенным водяным охладителем; циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным и независимым от охлаждаемой машины насосом или от водопроводной сети		ICW37 H 7I

Слід зазначити, що наведені приклади позначень способів охолодження (IC) дають зв'язок з конструкцією машини, що дуже важливо при проектуванні і оцінці її теплового стану.

6.3. Основні співвідношення

Для успішного охолодження машини заздалегідь розраховують об'єм повітря, що витрачається в одну секунду і проходить по вибраних напрямках, згідно схеми вентиляції машини. Цей об'єм називають "витратою повітря" і позначають літерою V з розмірністю $\text{м}^3/\text{с}$.

Величина витрати повітря залежить від втрат, що виділяються в машині і дорівнює:

$$V = K_e \sum p / (C_B \cdot \Delta\theta_{II}) \quad (6.2)$$

де $\sum p$, Вт- сумарні втрати в машині; $C_B = 1100$, Дж/(°C · м³) - теплоємність повітря; $\Delta\theta_{II} = (\theta_{Г.П} - \theta_{Х.П})$, °C - різниця (або перевищення) температури між повітрям, що виходить (гарячим) з машини $\theta_{Г.П}$, і вхідним в машину (холодним) повітрям $\theta_{Х.П}$; K_e - коефіцієнт, що враховує ефективність охолодження, лежить в межах від 1 і вище.

Величина $\Delta\theta_{II}$ залежить від класу нагрівостійкості електричної машини. Для класів нагрівостійкості А, Е і В приймають $\Delta\theta_{II} = 200^\circ\text{C}$, для класів нагрівостійкості F і Н - $\Delta\theta_{II} = 300^\circ\text{C}$, а для турбо - і гідрогенераторів - 250°C . Приведені величини $\Delta\theta_{II}$ складають (25...30)% температури перевищення нагріву обмоток статора над навколишнім середовищем. Температура навколишнього середовища приймається згідно міждержавного стандарту ГОСТ 183-74 - 400°C .

Для проходження (прогону) через машину витрат повітря, що вимагається (6.2), необхідно створити відповідний тиск (або напір) вентилятором. Тиск позначають літерою H , має розмірність Па(Н/м²) і пов'язаний з витратою повітря виразом

$$H = Z \cdot V^2 \quad (6.3)$$

де Z - постійна, що має розмірність Н · с² / м⁸ або Па · с² / м⁶.

Використовуючи (6.3), прийнято називати залежність $H = f(V)$ для машини - аеродинамічною характеристикою повітропроводу електричної машини, а залежність

$$Z = H / V^2 \quad (6.4)$$

називають аеродинамічним опором повітропроводу всієї машини.

Тиск, що створює вентилятор H , витрачається на компенсацію втрат тиску (напору) на окремих ділянках, що прямують один за одним по напрямку руху потоку повітря. У разі розімкненого циклу вентиляції до цих втрат тиску слід додати швидкісний або динамічний тиск, який витрачається на викид повітря у навколишнє середовище. Цей динамічний тиск (втрати напору) рівний кінетичній енергії

$$W = m \cdot g^2 / 2 \quad (6.5)$$

який для одиничної площі перерізу місця виходу повітря з машини можна записати як

$$Hd = \gamma \cdot g^2 / 2 = \xi d g^2 \quad (6.6)$$

де Hd - динамічний тиск (напір), Па; $\gamma = 1,2$ - питома густина повітря, кг/м³; $\xi d = \gamma / 2 = 0,6$ - коефіцієнт динамічного тиску, Па · с² / м²; g - швидкість повітря при виході в навколишнє середовище, м/с.

З теорії гідродинаміки випливає, що падіння тиску пропорційне квадрату швидкості руху повітря, тому для будь-якої ділянки повітропроводу можна записати втрати тиск

$$H_i = \xi_i \cdot g^2 \quad (6.7)$$

де ξ_i - аеродинамічний коефіцієнт, що враховує характер і геометричні розміри і-ї ділянки повітропроводу машини.

Вирази (6.2) і (6.7) дозволяють знайти вираз для аеродинамічного опору і-ї ділянки повітропроводу:

$$Z_i = H_i / V_i^2 = \xi_i \cdot g_i^2 / V_i^2 = \xi_i / (V_i / g_i)^2 = \xi_i \cdot (1 / S_i^2) \quad (6.8)$$

де S_i - переріз і-ї ділянки повітропроводу.

Таким чином, розрахувавши аеродинамічні опори всіх ділянок повітропроводу, визначивши Z всієї машини, можна по необхідній витраті повітря V (6.2) знайти тиск, який повинен створити вентилятор. По відомому тиску і витраті повітря далі визначають швидкість руху повітря над охолоджуючими поверхнями. Величини цих швидкостей дозволяють розраховувати або знайти коефіцієнти тепловіддачі з поверхні у тепловому розрахунку.

6.4. Аеродинамічні опори

Розрахунок аеродинамічних опорів окремих ділянок повітропроводу дозволяє визначити повний аеродинамічний опір повітропроводу (тобто машини для циклу вентиляції, що розглядається), а потім використовуючи (6.3), розрахувати необхідний тиск, який повинен створити вентилятор.

Для визначення аеродинамічних опорів окремих ділянок повітропроводу необхідно:

- мати повні дані про геометричні розміри машини;
- знати схему вентиляції, тобто шляхи послідовного переміщення повітря;
- виділити ділянки повітропроводу, де мають місце втрати тиску (або падіння напору);
- вміти визначити поперечні перерізи ділянок, де відбувається падіння тиску.

Геометричні розміри активних і конструктивних частин машини при заданій схемі вентиляції визначають при електромагнітному розрахунку. Це дозволяє на робочій ділянці вказати напрям послідовного переміщення повітря і визначити поперечні перерізи ділянок, через які переміщається повітря.

Розрізняють наступні ділянки повітропроводу, де відбувається падіння тиску (напору):

- вхід повітря в машину;
- різке (раптове) розширення каналу;
- різке (раптове) звуження каналу;
- поворот каналу з постійним перерізом, але гострими кромками кутів;
- вузькі і довгі канали.

Кожна з перерахованих ділянок характеризується певною величиною аеродинамічного коефіцієнта ξ_i , який дозволяє розрахувати аеродинамічний опір

$$Z_i = \xi_i \cdot (1 / S_i^2) \quad (6.9)$$

де S_i - поперечний переріз i -ї ділянки повітропроводу.

Оскільки геометрія і конфігурація ділянок повітропроводу достатньо складна, тому величини ξ_i приймають на підставі експериментальних даних. Хоча визначення величин ξ_i і Z_i носить наближений характер, проте дозволяє оцінити місця з підвищеними втратами тиску, дати рекомендації по зміні геометрії повітропроводу і вибору вентилятора. В зв'язку з цим остаточну оцінку якості вентиляції визначають при тепловому випробуванні машини.

Нижче приведені величини аеродинамічних коефіцієнтів для перерахованих вище ділянок повітряпроводу, де відбуваються втрати тиску.

Втрати тиску відбуваються при вході повітря в машину і канали в ній. Величина аеродинамічного коефіцієнту входу залежить від конфігурації (форми) краю круглого вхідного отвору. На підставі результатів дослідів їх приймають:

- для виступаючих або загострених кутів (рис. 6.25)

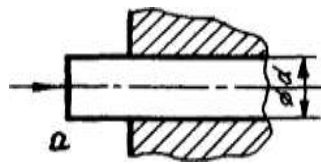


Рис. 6.25.

$$\xi_{\text{вх}} = 0,6 \quad \text{Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2 \quad (6.10)$$

- для прямокутних країв (рис. 6.26)

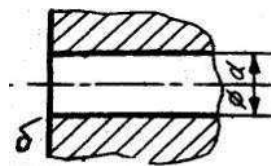


Рис. 6.26.

$$\xi_{\text{вх}} = 0,3 \quad \text{Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2 \quad (6.11)$$

- для закруглених кутів (рис. 6.27)

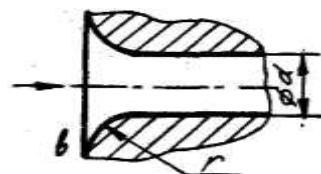


Рис. 6.27.

$$\xi_{\text{вх}} = 0,125 \quad \text{Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2 \quad (6.12)$$

якщо радіус закруглення вхідного отвору каналу r рівний $0,1d$;

- для закруглених кутів при $r \cong d$

$$\xi_i = 0 \quad (6.13)$$

Втрати тиску мають місце при зміні перерізу повітропроводу. При різкому розширенні (рис. 6.28)

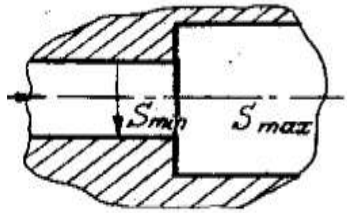


Рис. 6.28.

$$\xi_{расш} = \xi_d \cdot (1 - S_{\min} / S_{\max}) \quad (6.14)$$

а при різкому звуженні (рис. 6.29)

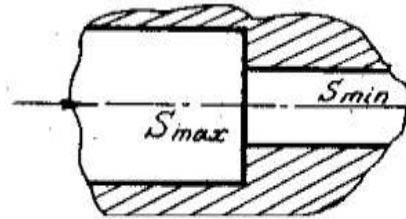


Рис. 6.29.

$$\xi_{суж} = 0,35 \cdot (1 - S_{\min} / S_{\max}) \quad (6.15)$$

При повороті каналу постійного перерізу з гострими кромками має місце падіння тиску. Значення аеродинамічного коефіцієнта для цього випадку залежить від кута повороту згідно рис. 6.30.

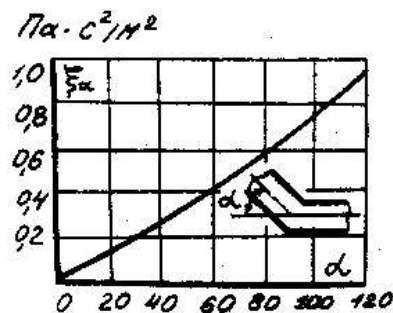


Рис. 6.30.

Втрати тиску слід враховувати у круглих і довгих каналах за рахунок тертя повітря об стінки каналу. Для цих випадків (рис. 6.31) аеродинамічний коефіцієнт дорівнює:

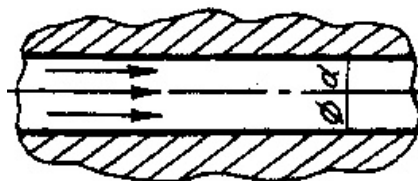


Рис. 6.31.

$$\xi_{тр} = \lambda \cdot l_k / d_k \cdot \gamma / 2 = \lambda \cdot l_k / d_k \cdot \xi_d = 0,6 \cdot \lambda \cdot l_k / d_k \quad (6.16)$$

де $\lambda \approx 0,08$ - коефіцієнт тертя повітря об стінки каналу; l_k і d_k - відповідно довжина і

діаметр каналу.

Враховуючи наближену величину коефіцієнта тертя λ , вираз (6.16) прийме вигляд

$$\xi_{mp} = 0,05 \cdot l_k / d_k \quad (6.17)$$

Якщо канал має прямокутну форму, то замість d_k застосовують еквівалентний діаметр для випадків:

- розміри прямокутника a і b співрозмірні

$$d_e = 2ab / (a + b) \quad (6.18)$$

- прямокутник має $a \gg b$

$$d_e = b \quad (6.19)$$

Знайдені величини аеродинамічних коефіцієнтів дозволяють визначити аеродинамічні опори окремих ділянок, використовуючи (6.9), і падіння натиску на цій ділянці

$$H_i = Z_i \cdot V_i^2 = \xi_i \cdot (1 / S_i^2) \cdot V_i^2 = \xi_i \cdot \mathcal{Q}_i^2 \quad (6.20)$$

де $\mathcal{Q}_i = V_i / S_i$ - швидкість руху повітря на i -й ділянці, м/с.

6.5. Вентиляційна схема заміщення

З'єднання аеродинамічних опорів ділянок один за іншим по ходу переміщення струменів повітря утворюють для конкретної схеми вентиляції певну сукупність з'єднань, яку називають вентиляційною схемою заміщення.

Вентиляційна схема заміщення необхідна:

- для знаходження загального (сумарного) аеродинамічного опору машини з метою визначення розрахунку тиску вентилятора (6.3), який забезпечить необхідну витрату повітря (6.2);

- для побудови аеродинамічної характеристики повітропроводу машини з метою перевірки ефективності вибраного або спроектованого вентилятора;

- для визначення швидкості повітря над поверхнями, з яких відводиться (підводиться) тепло.

В загальному випадку вентиляційна схема заміщення може складатися з ряду послідовно і паралельно з'єднаних аеродинамічних опорів. Знаходження загального аеродинамічного опору вимагає їх складання, тобто заміною еквівалентними.

При послідовному з'єднанні аеродинамічних опорів (рис. 6.32) витрата повітря однакова на всіх ділянках повітропроводу, а натиск вентилятора врівноважується сумою падінь натиску на окремих ділянках.

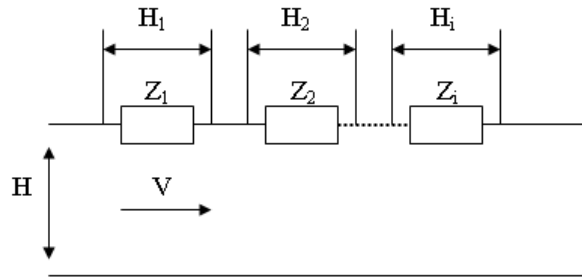


Рис. 6.32. - Втрати при послідовному з'єднанні опорів

Це дозволяє записати:

$$Z_{\Sigma} = H / V^2 = (H_1 + H_2 + \dots + H_i) / V^2 = H_1 / V^2 + H_2 / V^2 + \dots + H_i / V^2 = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_i \quad (6.21)$$

Таким чином, еквівалентний (або сумарний) аеродинамічний опір визначають складанням всіх послідовно включених опорів (аналогічно електричному колу).

Паралельне з'єднання аеродинамічних опорів приведено на рис. 6.33.

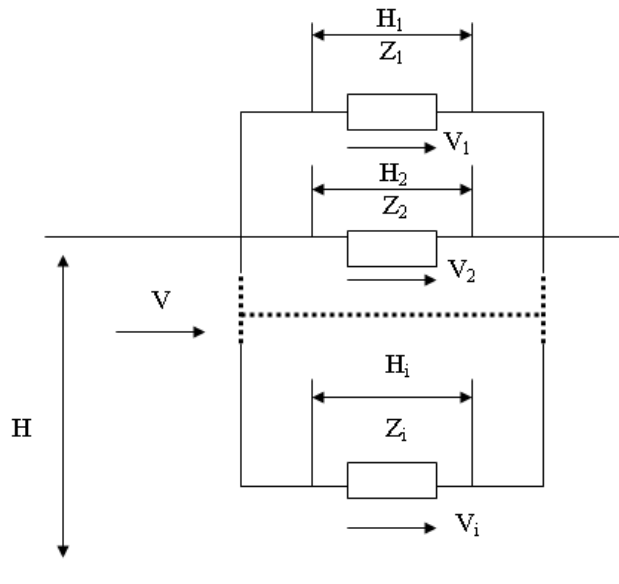


Рис. 6.33. - Втрати при паралельному з'єднанні опорів

Звідки випливає, що загальна витрата повітря розподіляється по окремих ділянках повітропроводу, а падіння тиску (напору) на всіх ділянках однаково, тобто:

$$H = H_1 = H_2 = \dots = H_i \quad (6.22)$$

Використовуючи вираз (6.22), можна записати:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma} &= \frac{H}{V^2} = \frac{H}{(V_1 + V_2 + \dots + V_i)^2} = \frac{H}{(\sqrt{\frac{H_1}{Z_1}} + \sqrt{\frac{H_2}{Z_2}} + \dots + \sqrt{\frac{H_i}{Z_i}})^2} = \\ &= \frac{H}{(\sqrt{\frac{H}{Z_1}} + \sqrt{\frac{H}{Z_2}} + \dots + \sqrt{\frac{H}{Z_i}})^2} = \frac{1}{(\sqrt{\frac{1}{Z_1}} + \sqrt{\frac{1}{Z_2}} + \dots + \sqrt{\frac{1}{Z_i}})^2} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Вирази (6.22) і (6.23) дозволяють вентиляційну схему заміщення представити у вигляді одного загального опору $Z_{\text{заг}}$ (рис. 6.34) і визначити необхідний напір H вентилятора, що забезпечує раніше розраховану витрату повітря V .

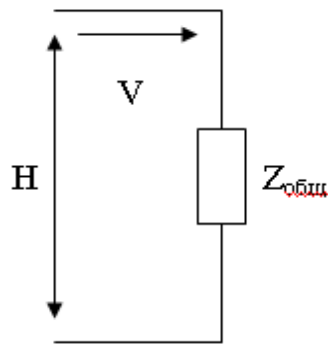


Рис. 6.34. - Вентиляційна схема заміщення

Якщо прийнятий або спроектований вентилятор забезпечує рівні або більші величини H і V , то розгортають схему на рис. 6.34 у зворотному напрямі. При цьому використовують раніше отримані залежності між H , V і Z та розраховують витрати повітря і втрати тиску повітря на окремих ділянках повітропроводу. По витраті повітря над ділянками, з поверхні яких відводиться тепло, визначають швидкість руху повітря:

$$g_i = V_i / S_i \quad (6.24)$$

де S_i - площа перерізу, через яку проходить повітря об'ємом V_i .

Саме визначення цих швидкостей над поверхнями, що охолоджуються, є кінцевим результатом вентиляційного розрахунку; величини швидкостей передають у розрахунок теплової оцінки машини, де по них визначають коефіцієнти теплопередачі з поверхні шляхом конвекції.

6.6. Типи вентиляторів. Статична характеристика

Питання вибору типу вентиляторів і можливості забезпечення ним тиску при необхідній витраті повітря, що вимагається - важливий етап вентиляційних розрахунків.

Для вентиляції машин можливі три типи вентиляторів:

- відцентровий, рис. 6.35;
- пропелерний або осьовий, рис. 6.36;
- комбінований, рис. 6.37.

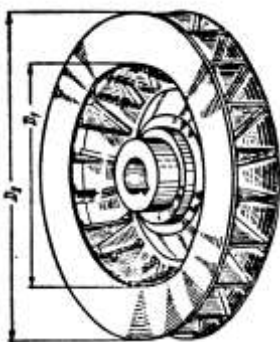


Рис. 6.35.

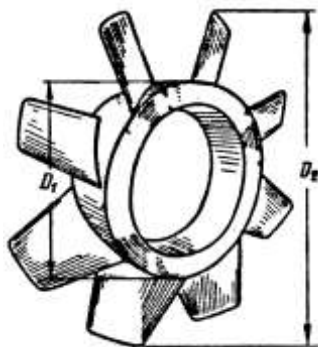


Рис. 6.36.

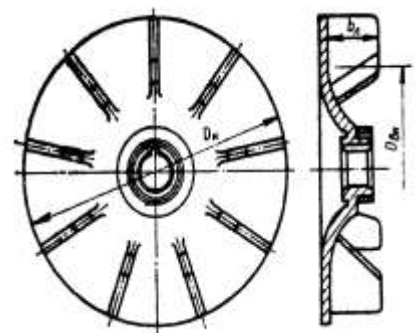


Рис. 6.37.

Частіше всього ці типи вентиляторів використовують в штучних самовенти-

люючих схемах, тобто вбудовуються в машину і розташовуються на її валу.

Принцип дії вентилятора заснований на тому, що при обертанні його лопатки створюють відцентрове переміщення повітря - від внутрішніх розмірів вентиляційного колеса з діаметром D_1 до зовнішнього - D_2 , рис. 6.35 та рис. 6.36. В результаті на виході вентилятора повітрям створюється підвищений тиск, а на вході – понижений (розрядженість). Під дією підвищеного тиску на виході здійснюється переміщення повітря (або газу) по шляхах повітропроводу. Понижений тиск на вході вентилятора викликає постійний підтік (надходження) повітря з навколишнього середовища.

Щоб підвищити ефективність вентиляції (направити більшу кількість повітря у корисний напрям повітропроводу), ставлять дифузори, наприклад, в асинхронних двигунах серії 4А з висотою обертання 200...250 мм. Дифузор (кожух) практично усуває зв'язок між зонами високого і низького тиску вентилятора, виключаючи неефективне переміщення повітря безпосередньо навкруги вентилятора.

Перераховані типи вентиляторів володіють особливостями:

- відцентрові вентилятори (рис. 6.35) створюють відносно великі напори (тиски) і менші витрати повітря, володіють меншим ККД (близько 0,2) у порівнянні з осьовими вентиляторам;

- осьові вентилятори (рис. 6.36) створюють відносно великі витрати повітря при менших тисках, мають більш високий ККД (близько 0,8) в порівнянні з відцентровими вентиляторам;

- комбіновані вентилятори (рис. 6.37) володіють усередненими властивостями вище перелічених типів вентиляторів, застосовуються рідко через складність конструкції.

Осьові вентилятори використовуються у високошвидкісних машинах, наприклад, в турбогенераторах.

Більш широке розповсюдження отримали відцентрові вентилятори, які виконують при різних частотах обертання і у разі потреби реверсів. Такий універсалізм досягається різними формами (відгинами) лопаток вентиляторів.

При реверсивних режимах роботи або у випадках, коли напрям обертання машини не встановлюється, застосовують радіальні лопатки (рис. 6.38).

В тихохідних машинах, як правило, напрям обертання указується, оскільки для підвищення ефективності вентиляційних властивостей лопатки згинають по напрямку обертання (рис. 6.39). У разі зміни напрямку обертання різко знизяться тиск і витрата повітря, які створює такий вентилятор, що викличе надмірний нагрів машини.

В швидкохідних машинах лопатки згинають у напрямі, протилежному напрямку обертання, рис. 6.40, що знижує витрати енергії (вентиляційних втрат) при достатньому рівні охолодження машини. Зрозуміло, на таких машинах обов'язково вказують напрям обертання. Порушення вимоги по напрямку обертання призводить до зростання вентиляційних втрат (а значить, зниження ККД машини в цілому), надмірної витрати охолоджуючого повітря і навіть шуму.

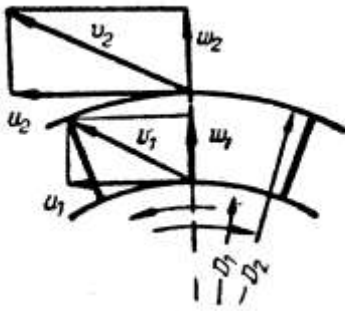


Рис. 6.38.

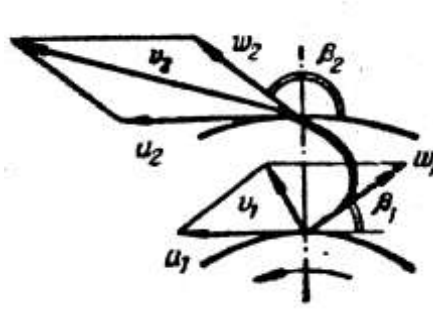


Рис. 6.39.

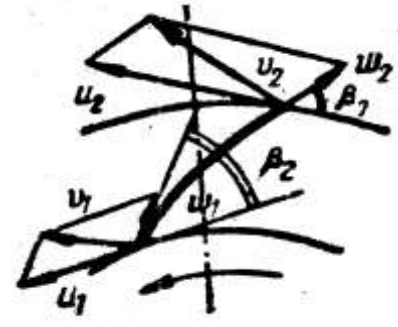


Рис. 6.40.

На рис. 6.38, рис. 6.39 і рис. 6.40 показані вектори напрямів рухів повітря і відповідні кути відгинів лопаток. Використовуючи ці величини теорія вентиляторів дає зв'язок статичного тиску H (Па) в залежності від витрати повітря V (м³/с). Цю залежність $H = f(V)$ називають статичною характеристикою вентилятора і описують виразом

$$H = \eta_a \cdot \gamma \cdot [u_2 \cdot v_2 \cdot \cos(u_2 \wedge v_2) - u_1 \cdot v_1 \cdot \cos(u_1 \wedge v_1)] \quad (6.25)$$

де η_a - аеродинамічний ККД лопаток, враховує втрати напору (тиску) в самому вентиляторі, в практиці електромашинобудування приймають:

- $\eta_a = 0,5$ - для вентилятора з лопатками зі згином проти обертання;
- $\eta_a = 0,75$ - для лопаток зі згином по напрямку обертання;
- $\eta_a = 0,6$ - для випадку радіальних лопаток;
- $\gamma = 1,2 \text{ кг/м}^3$ - питома маса (густина) повітря;
- u_1 і u_2 - величини векторів окружних швидкостей відповідно внутрішнього і зовнішнього діаметрів лопаток вентилятора (рис. 6.38, рис. 6.39 і рис. 6.40), м/с;
- v_1 і v_2 - величини векторів абсолютних швидкостей переміщення повітря, відповідно до рис. 6.38, рис. 6.39 і рис. 6.40, м/с; ці швидкості частинок повітря є геометрична сума вектора окружної швидкості u і вектора середньої відносної швидкості частинок повітря ω відносно стінок (поверхонь) лопаток.

Вигляд статичних характеристик відцентрових вентиляторів у відносних одиницях, згідно рівності (6.25), наведені на рис. 6.41.

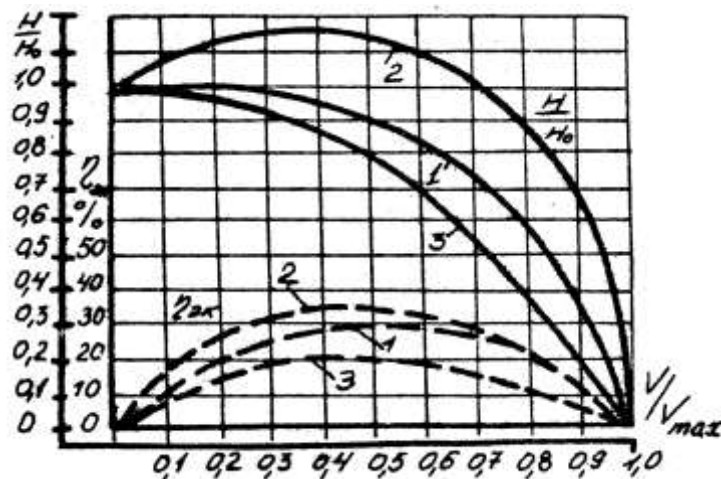


Рис. 6.41. - Статичні характеристики 1 - для лопаток, відігнутих проти напрямку обертання; 2 - для лопаток, відігнутих у бік обертання; 3 - для лопаток радіальних.

Там же наведені залежності енергетичного ККД вентиляторів від витрати повітря $\eta_e = f(V)$, причому енергетичний (або механічний) ККД визначає витрату енергії (або механічної роботи) на обертання вентилятора. Його величину знаходять з виразу

$$\eta_e = \frac{H \cdot V}{P_g} \quad (6.26)$$

де H - статичний тиск, що розвивається вентилятором, Па; V - витрата повітря, що забезпечується вентилятором, $\text{м}^3/\text{с}$; P_g - потужність, що споживається вентилятором, Вт.

З рис. 6.41 видно, що найбільше значення енергетичного ККД лежить у межах від 0,4...0,6 найбільшої витрати повітря. Крім того, їх максимальна величина залежить від типу лопаток:

- $\eta_{e \max} = 0,25 \dots 0,30$ - для відігнутих проти напрямку обертання;
- $\eta_{e \max} = 0,30 \dots 0,40$ - для відігнутих по напрямку обертання;
- $\eta_{e \max} = 0,15 \dots 0,20$ - для радіальних.

Дуже важливими для вентиляційних розрахунків є крайні точки статичної характеристики вентилятора.

Перша точка - $H = H_{\max}$ при $V = 0$. Її називають точкою неробочого ходу (по аналогії з точкою неробочого ходу зовнішньої характеристики генераторів). Створюють (або моделюють) у цій точці режим вентилятора, що обертається, шляхом закриття всіх зовнішніх отворів вентилятора, наприклад, заклеїти папером. В цьому випадку під дією відцентрових сил, що діють на частинки повітря всередині вентилятора, на закрити зовнішню поверхню вентилятора має місце максимальний тиск $H = H_{\max} = H_0$. При цьому витрата повітря $V = 0$ (по аналогії із неробочим ходом генератора - напруга є, а струм - відсутній). Крім того, з діаграми швидкостей витікає, що $u = v$, а з (6.25) - статичний тиск вентилятора, що розвивається при неробочому ході,

$$H_0 = \eta_a \cdot \gamma \cdot (u_2^2 - u_1^2) \quad (6.27)$$

Другою крайньою точкою статичної характеристики вентилятора є - $V = V_{\max}$ при $H = 0$. Її називають точкою або режимом короткого замикання (по аналогії із зовнішньою характеристикою генераторів: струм максимальний, а напруга дорівнює нулю). Здійснюють цей режим за відсутності на виході (або вході) вентилятора зовнішнього повітропроводу (тобто відсутні аеродинамічні опори): вентилятор викидає повітря безпосередньо в зовнішнє середовище. В такому режимі працюють вентилятори, що переміщують повітря в приміщеннях з метою створення комфортних умов у жарку погоду.

Величина максимальної витрати повітря $V_{\max}$, $\text{м}^3/\text{с}$, залежить від нахилу лопаток вентилятора. Її приблизно визначають:

- у високошвидкісних машинах з лопатками, нахиленими (відігнутими) проти напрямку обертання і кутами нахилу з $\beta_1 = \beta_2 = 25^\circ$

$$V_{\max} \approx 0,35 \cdot u_2 \cdot S_2 \quad (6.28)$$

- в низькошвидкісних машинах з лопатками, нахиленими (відігнутими) по напрямку обертання і кутами нахилу з $\beta_1 = 25^\circ$ і $\beta_2 = 155^\circ$

$$V_{\max} \approx 0,5 \cdot u_2 \cdot S_2 \quad (6.29)$$

- для реверсивних машин з радіальними лопатками і з кутами нахилу $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$

$$V_{\max} \approx 0,42 \cdot u_2 \cdot S_2 \quad (6.30)$$

Зовнішня поверхня вентилятора, через яку проходить повітря, дорівнює

$$S_2 = 0,95 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_{\text{л}}, \text{ м}^2 \quad (6.31)$$

де D_2 - зовнішній діаметр вентилятора, м; $b_{\text{л}}$ - аксіальна ширина лопаті, м.

Особливо слід зазначити, що по розрахованих тиску H і витраті повітря V для номінального режиму приблизно знаходять і їх максимальні величини

$$H_{\max} = H_0 \approx H_{\text{ном}} \frac{1}{0,75} \quad (6.32)$$

$$V_{\max} = 2V_{\text{ном}} \quad (6.33)$$

Відомі величини H_0 і $V_{\max}$ використовують:

- для вибору готового вентилятора при незалежній вентиляції; в паспортних даних таких вентиляторів вказують величини $H_0 = H_{\max}$ і $V_{\max}$;
- для розрахунку вбудованих в машину вентиляторів при системі самовентиляції.

У вентиляційних розрахунках, як правило, будують статичну характеристику для визначення робочої точки вентилятора, тобто уточнення витрати повітря при тиску, що вимагається.

Для вентиляторів з радіальними лопатками статична характеристика $H = f(V)$ у відносних одиницях достатньо точно має вираз

$$H / H_0 = H^* = 1 - (V / V_{\max}^*)^2 = 1 - (V^*)^2 \quad (6.34)$$

Побудувавши залежність $H^* = f(V^*)$ і на тому ж графіку аеродинамічну характеристику повітропроводу у відносних одиницях, знаходять точку перетину цих кривих, яка і визначає робочу точку вентилятора, рис. 6.42. Ця точка повинна лежати в межах $(0,4 \dots 0,6)V_{\max}^*$, що відповідає енергетичному ККД близькому до максимального, а також задовольняти вимогам до величин $H_{\text{ном}}$ і $V_{\text{ном}}$.

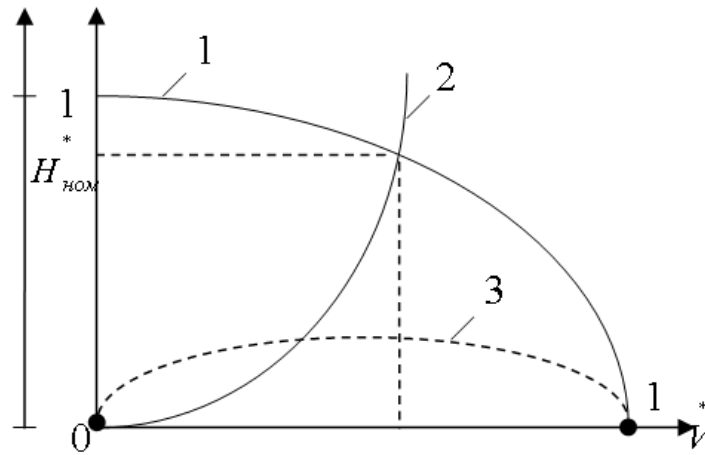


Рис. 6.42. - Робоча точка вентилятора
 1 - статична характеристика вентилятора;
 2 - аеродинамічна характеристика повітропроводу;
 3 - характеристика енергетичного КПД.

Для підвищення енергетичного ККД вентиляторів з відігнутими (нахиленими) лопатками і тих, які мають постійну частоту обертання при роботі машини, розраховують кут нахилу входної кромки лопатки β_1 з метою забезпечення безударного входу повітря між лопатками. На рис. 6.43 показані вектори руху повітря:

- ω_1 - вектор відносної швидкості руху повітря біля входної кромки вентилятора;
- c_{r1} - вектор радіальної швидкості повітря на вході кромки;
- u_1 - вектор тангенціальної (дотичної) швидкості руху повітря на вході кромки.

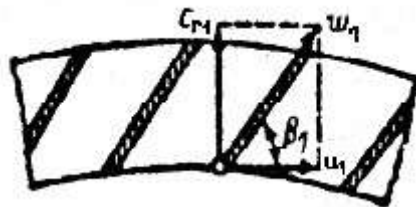


Рис. 6.43. - Вектор руху повітря

Вважають, що при безударному вході повітря у вентилятор струмені повітря, що входять в колесо вентилятора, закручуються до швидкості $u_1/2$. Тоді необхідний кут нахилу лопаток

$$\beta \approx \arctg \frac{2 \cdot c_{r1}}{u_1} \quad (6.35)$$

де $c_{r1} = V/S_1$ - радіальна швидкість переміщення; V - витрата повітря, що забезпечується вентилятором; S_1 - площа входу повітря в колесо; $u_1 = \pi \cdot D_1 \cdot n$ - лінійна швидкість входних кромки лопаток вентилятора.

З (6.35) витікає, що безударний вхід повітря можна забезпечити тільки при одній швидкості обертання, оскільки із зміною частоти обертання змінюються u_1 , V і c_{r1} .

Для вентиляторів з радіальними лопатками безударний вхід повітря у вентилятор забезпечити неможливо.

6.7. Розрахунок відцентрового вентилятора

Найбільше розповсюдження для самовентиляції електричних машин знайшли вбудовані відцентрові вентилятори, які відрізняються простотою конструкції і можливостями здійснення будь-якого напрямку обертання, у тому числі і реверсу.

Вихідними даними для розрахунку вентилятора є:

- зовнішній діаметр вентилятора D_2 , величину якого визначає проектувальник з урахуванням схеми вентиляції і вимог до габаритів машини;
- частота обертання n , номінального режиму;
- необхідна витрата (об'єм) повітря V , розрахована по (6.2).

Розрахунок здійснюють за наступною послідовністю.

1 Величина зовнішньої окружної швидкості вентилятора

$$u_2 = \pi \cdot D_2 \cdot n / 60 \quad (6.36)$$

2 З умови максимального енергетичного ККД приймають максимальну витрату повітря

$$V_{\max} \approx 2V \quad (6.37)$$

3 Необхідний переріз на виході (на зовнішній кромці) вентилятора з врахуванням (6.30), (6.36) і (6.37)

$$S_2 \approx \frac{V_{\max}}{0,42 \cdot u_2} = \frac{2 \cdot V \cdot 60}{0,42 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot n} \quad (6.38)$$

4 Використовуючи (6.31), визначають ширину лопатки

$$b_l = \frac{S_2}{0,95 \cdot \pi \cdot D_2} \quad (6.39)$$

5 Подальші розрахунки є підготовчими, щоб визначити внутрішній діаметр колеса вентилятора D_1 , який повинен забезпечити роботу вентилятора при максимальному енергетичному ККД, тобто при $V \cong 0,5 \cdot V_{\max}$ і $H = 0,75 \cdot H_0$, що впливає із статичної характеристики вентилятора (рис. 6.41).

5.1 Найбільший тиск (режим неробочого ходу), який повинен забезпечити вентилятор (6.32)

$$H_0 = \frac{H}{0,75} = \frac{Z \cdot V^2}{0,75} \quad (6.40)$$

де Z - сумарний (повний) аеродинамічний опір повітропроводу машини, який визначають, повністю звернувши вентиляційну схему заміщення повітропроводу до еквівалентного опору.

5.2 Підставивши в (6.27) вираз (6.40), знаходять окружну швидкість внутрішньої кромки (по діаметру D_1) вентилятора

$$u_1 = \sqrt{u_2^2 - \frac{Z \cdot V^2}{0,75 \cdot \gamma \cdot \eta_a}} \quad (6.41)$$

де γ - питома маса повітря; $\eta_a = 0,6$ - аеродинамічний коефіцієнт відцентрового вен-

тилятора з радіальними лопатками.

5.3 Розмір діаметра внутрішнього колеса

$$D_1 = \frac{60 \cdot u_1}{\pi \cdot n} \quad (6.42)$$

5.4 Орієнтовне число лопаток вентиляційного колеса

$$N_l = (6 \dots 10) \frac{D_2}{D_2 - D_1} \quad (6.43)$$

5.5 Остаточного прийняте число N_l повинне бути непарним (момент інерції по взаємно перпендикулярних осях повинен бути однаковий) і відповідати рекомендаціям: 13 лопаток при $D_2=200\text{мм}$; 17 - при 250мм; 23 - при 300мм; 29 - при 350мм; 31 - при 400мм.

5.6 Перевірка достатності забезпечення розрахованим вентилятором витрати повітря здійснюють побудовою статичної характеристики спроектованого вентилятора, використовуючи (6.34), і аеродинамічної характеристики повітропроводу на одному графіку (рис. 6.42). Знайшовши точку їх перетину, визначають H і V . Ці величини реально забезпечує вентилятор. Далі їх необхідно порівняти з розрахованими по (6.2) і (6.3), куди входить сумарний аеродинамічний опір повітропроводу машини.

Реальні величини H і V вентилятора повинні бути рівними або більше відповідно розрахункових. При цьому робоча точка повинна бути в діапазоні $V \approx (0,4 \dots 0,6)V_{\max}$, забезпечуючи прийнятний енергетичний ККД.

5.7 Потужність, що споживається вентилятором

$$P_e = \frac{H \cdot V}{\eta_e} \quad (6.44)$$

де $\eta_e \approx 0,15 \dots 0,2$ - енергетичний ККД вентилятора з радіальними лопатками.

На завершення слід зазначити, що розрахунок вентилятора уточнюється у випадках, коли:

- реальні H і V менше розрахункових;
- не забезпечується прийнятна величина енергетичного ККД (надмірний тиск або витрата);
- розрахований вентилятор не забезпечує необхідних швидкостей переміщення повітря над охолоджуваними поверхнями у тепловому розрахунку.

При виготовленні вентилятора і проектуванні машини рекомендують:

- забезпечувати достатню жорсткість конструкції вентилятора;
- закругляти вхідні і вихідні кромки лопаток;
- округляти отвори в щитах для входу і виходу повітря;
- передбачити камеру розширення між зовнішнім діаметром вентилятора і внутрішньою поверхнею підшипникового щита.

Ці заходи сприяють підвищенню надійної роботи і зниженню шумів вентилятора.

Опорний конспект розрахунку відцентрового вентилятора приведений на рис. 6.44.

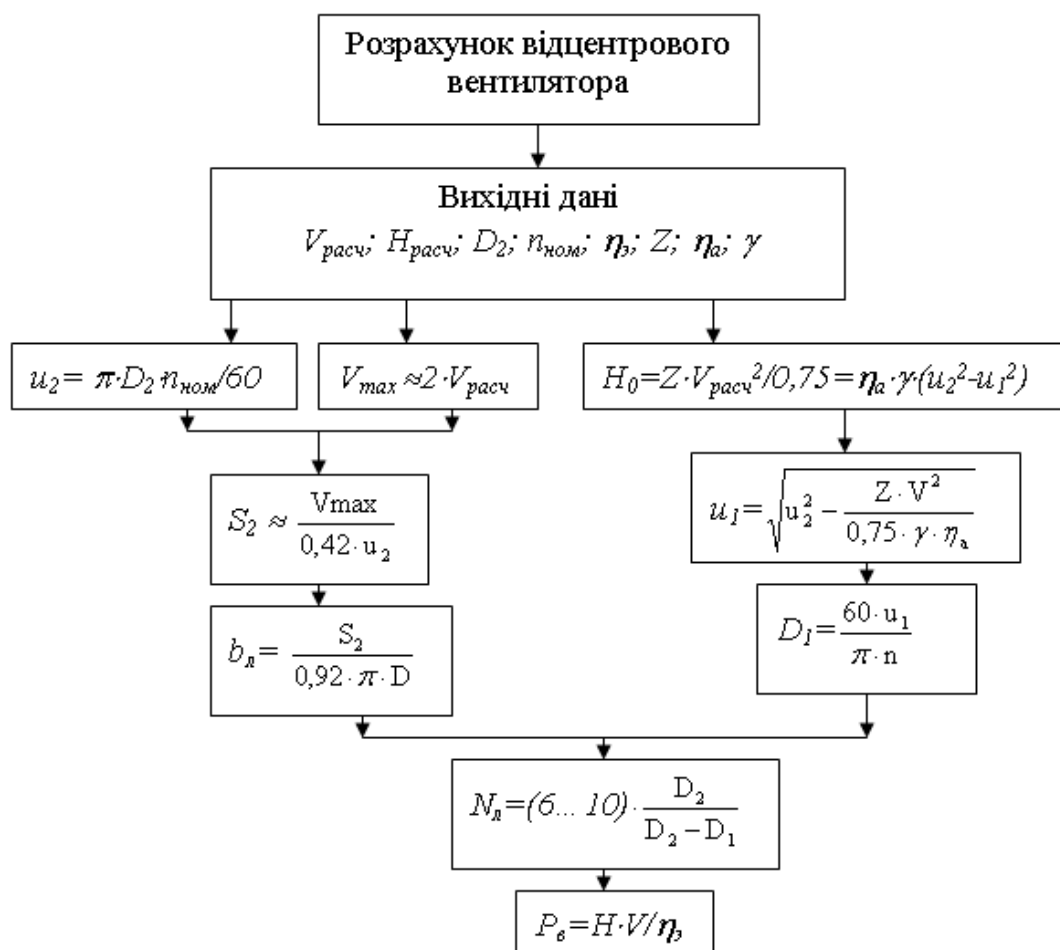


Рис. 6.44. - Опорний конспект

РОЗДІЛ № 7. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

7.1. Загальні відомості

Відомо, що при перетворенні енергії в електричній машині різниця між величинами активних споживаної і корисною потужностями відповідає величині потужності втрат. Ці втрати виділяються у активних і конструктивних частинах електричної машини і проявляються у вигляді нагріву цих частин.

Ступінь нагрівання окремих матеріалів, які застосовують при виготовленні електричної машини, визначає термічну міцність і, отже, надійність роботи електричної машини в цілому.

Надмірне нагрівання у загальному випадку прискорює старіння ізоляції (зокрема, обмоток) і навіть може призвести до руйнування (вигорання). Крім того, можливе порушення механічної міцності окремих вузлів (наприклад, плавленням). У зв'язку з цим виникає необхідність контролю нагрівання активних і конструктивних матеріалів електричної машини.

Метою теплового розрахунку є визначення ступеня нагрівання окремих частин електричних машин, а так само у прийнятті заходів до припустимих і раціональних величинам їх нагрівання.

Контроль ступеня нагрівання оцінюється за допомогою температури у градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) або Кельвіна (K) наступними методами:

- методом термометру;
- методом опору;
- методом температурних індикаторів.

Щоб уникнути впливу на нагрівання температури навколишнього середовища, використовують прийняту стандартами найбільшу температуру охолоджувального середовища. Наприклад, для зон помірного і холодного клімату прийнята найбільша температура навколишнього повітря $\theta_{om.n} = 40^{\circ}\text{C}$ згідно міждержавного стандарту ГОСТ 183-74Е. Це дозволяє розрахувати перевищення або перегрів окремих вузлів електричної машини, незалежно від температури навколишнього середовища,

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{om.n} = \theta_i - 40^{\circ}\text{C} \quad (7.1)$$

де θ_i - температура і-того вузла конструкції; $\theta_{om.n}$ - температура оточуючого повітря.

Введення величини перевищення температури замість абсолютної температури дозволяє міждержавному стандарту ГОСТ 183-74Е встановити допустимі і обґрунтовані практикою чисельні величини перевищень температур для конкретних конструктивних частин різних типів електричних машин з урахуванням класу нагрівостійкості. Частково вимоги цього стандарту наведені в табл. 7.1 [2] і відносяться до сталому тепловому режиму.

Таблица 7.1 – Вимоги стандарту ГОСТ 183-74E [2]

Изоляционный материал классов по ГОСТ 8865-70													
А		Е		В		Р		Н					
Предельные длительно допускаемые превышения температуры в °С при измерении													
Части электрических машин	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра
	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра	методом сопоставления	методом темп. пирометров, уложенных в паз	методом термометра
1. Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВт·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	60	60	60	—	70	70	—	80	80	—	100	—	125
2. Обмотки: а) обмотки переменного тока машин мощностью менее 5000 кВт·А или с длиной сердечника менее 1 м; б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в подпунктах 3, 4, 5 настоящей таблицы;	50	60	—	65	75	—	70	—	85	100	105	—	125
в) якорные обмотки, соединенные с коллектором													

При проектуванні електричної машини слід враховувати її конструктивні особливості та умови експлуатації. До таких факторів належать: ступінь захисту, система охолодження, категорія розміщення, режим роботи та інші.

Особливо слід відзначити вплив на нагрівання режиму роботи, який познача-

ється літерою S і цифрою згідно міждержавного стандарту ГОСТ 183-74Е. Найбільш поширений режим S1 - тривалий, рис. 7.1. На рис. 7.2, рис. 7.3, рис. 7.4, рис. 7.5 показані особливості роботи, втрати і криві нагрівання відповідно для режимів: S2 - короткочасний; S3 - повторно-короткочасний; S5 - повторно-короткочасний з частими пусками і електрогальмуванням; S6 - перемежовуючий.

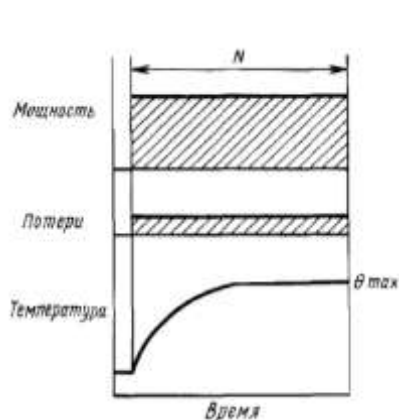


Рис. 7.1. - S1, тривалий

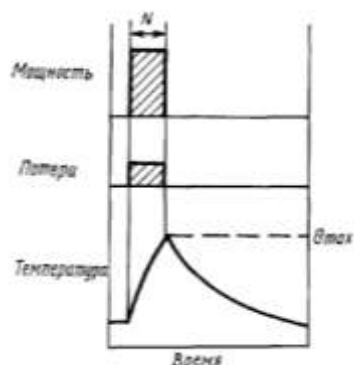


Рис. 7.2. - S2, короткочасний, тривалість $N=10, 30, 60, 90$ хв.

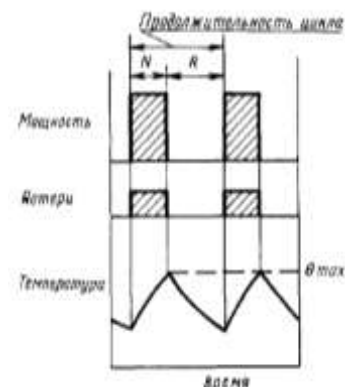


Рис. 7.3. - S3, повторно-короткочасний, ПВ=15, 25, 40 і 60%, ПЦ=10 хв.

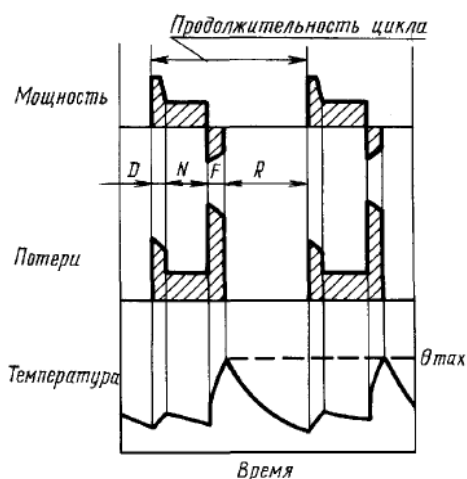


Рис. 7.4. - S5, повторно-короткочасний з частими пусками і електрогальмуванням, ПВ=5, 25, 40 і 60%, число включень 30, 60, 120, 240 на годину, коефіцієнт інерції $F1=1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0$.

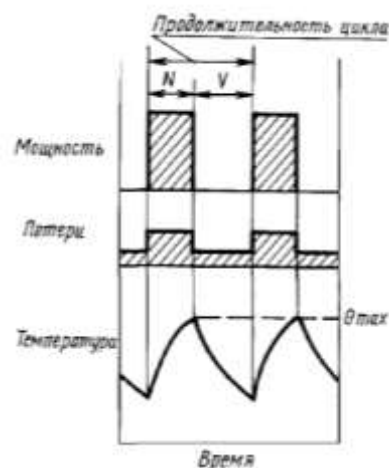


Рис. 7.5. - S6, який перемежовується, тривалість навантаження НП=15, 25, 40 і 60%, тривалість циклу 10 хв.

При теплових розрахунках електричної машини з режимами відмінними від тривалого, де втрати змінюються у часі, використовують втрати еквівалентні, які залишаються постійними, як це має місце для режиму тривалого, S1. Розрахунок у цьому випадку зводиться до розрахунку подібного для сталого режиму.

У сталому режимі температура нагріву окремих частин машини залишається постійною на протязі всього часу роботи.

Розрахунок нагрівання при сталому режимі, підхід до якого розглядається в цьому розділі докладно, здійснюється за допомогою еквівалентних теплових схем заміщення, використовуючи відомі для електричних кіл закони Ома, Кірхгофа і методи їх розв'язання.

Розрахунок змінних величин нагріву при несталих процесах здійснюють за

допомогою складних програм на ЕОМ шляхом вирішення диференціальних рівнянь. У даному розділі такі розрахунки не розглядаються, відносячи їх до спеціальних випадків.

7.2. Способи теплопередачі

В електричних машинах теплопередача здійснюється трьома відомими способами:

- випромінюванням;
- конвекцією;
- теплопровідністю.

У загальному випадку під теплопередачею слід розуміти як віддачу, так і прийом (тобто охолодження і нагрівання) енергії тепла.

Теплопередачу випромінюванням вважають передачу енергії тепла за допомогою електромагнітних хвиль як у повітряному просторі, так і у вакуумі. За законом Стефана-Больцмана теплопередача випромінюванням на одиницю поверхні

$$q_{\epsilon} = \sigma_{\epsilon}(T^4 - T_0^4) \quad (7.2)$$

де $q_{\epsilon}, \frac{Вт}{м^2}$ - питомий тепловий потік, здійснюваний випромінюванням;

$\sigma_{\epsilon}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ - коефіцієнт, що характеризує теплопередачу випромінюванням; величина його лежить в межах $\sigma_{\epsilon} = (1..5,5)$, причому більше значення відповідає абсолютно чорному тілу;

$T^4 - T_0^4, ^\circ K$ - різниця температур між гарячими і холодними поверхнями, або джерелом і поглиначем тепла.

У температурному діапазоні роботи електричних машин використовують залежність

$$q_{\epsilon} = \alpha_{\epsilon}(T - T_0) = \alpha_{\epsilon} \cdot \Delta\theta \quad (7.3)$$

де $\alpha_{\epsilon}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ - коефіцієнт теплопередачі випромінюванням;

$\Delta\theta = (T - T_0), ^\circ C$ - перевищення температури.

Загальна кількість тепла (потужності) з урахуванням (7.3) визначають як

$$Q_{\epsilon} = \alpha_{\epsilon} \cdot S_{\epsilon} \cdot \Delta\theta \quad (7.4)$$

де S_{ϵ} - площа поверхні випромінювання.

Вираз (7.4) використовують для розрахунку відведеного випромінюванням тепла з зовнішньої поверхні в електричних мікромашинах і машинах малої потужності, що працюють без штучної вентиляції (у спокійному повітрі) і мають гладку поверхню. У ряді випадків слід застосовувати обвідну поверхню випромінювання, як це роблять в трансформаторах з радіаторами охолодження.

Теплопередача конвекцією - це перенесення тепла за допомогою охолоджуючого агента (наприклад, повітря) від нагрітої поверхні до більш холодної. Іншими

словами, охолоджуючий агент, перебуваючи у нагрітій поверхні, нагрівається, потім пересувається (переносить тепло, енергію, потужність) до менш нагрітої поверхні, нагріваючи її. Цей перенос (конвекцію) розрізняють: природний і штучний. При природній конвекції рух охолоджуючого агента здійснюється за рахунок різниці питомих мас нагрітого і холодного агента; наприклад, у спокійному повітрі, яке оточує поверхню машини.

Штучна конвекція (пересування) здійснюється при примусовому русі охолоджуючого агента, наприклад, за допомогою вентилятора.

У загальному випадку кількість тепла, переданого конвекційним способом

$$Q_k = \alpha_k \cdot S_k \cdot \Delta\theta_k \quad (7.5)$$

де Q_k , Bm - кількість тепла (потужності); $\alpha_k, \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$ - коефіцієнт теплопередачі з поверхні; S_k, m^2 - площа поверхні конвекції; $\Delta\theta_k, ^\circ C$ - перепад (різниця) температур між поверхнею і охолоджуючим агентом.

При природній конвекції (в спокійному повітрі) коефіцієнт теплопередачі з поверхні приймають $\alpha_k \cong 8 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$ для вертикальної стінки заввишки 0,5м, температурі навколишнього повітря $20^\circ C$ і температурі стінки $35^\circ C$.

Сумарний коефіцієнт теплопередачі з вільної поверхні у спокійному повітрі дорівнює

$$\alpha = \alpha_g + \alpha_k \approx 6 + 8 \approx 14 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (7.6)$$

У закритих машинах і трансформаторах без особливого зовнішнього охолодження відводиться тепло становить

$$Q = \Delta\theta (6S_g + 8S_k), Bm \quad (7.7)$$

де $\Delta\theta, ^\circ C$ - температура нагріву масляного бака або корпусу електричної машини щодо навколишнього повітря.

Слід зазначити, що величина коефіцієнта теплопередачі конвекції у (7.6) дещо збільшується при висотах вертикальних стінок менше 0,5м і зменшується при висотах більше 0,5м. Теоретично цей коефіцієнт змінюється пропорційно

$$\alpha = \alpha_{0.5} \cdot \sqrt[4]{\frac{0.5}{H}} \quad (7.8)$$

де H, m - висота поверхні, яка омита повітрям.

Відзначимо, що коефіцієнт теплопередачі з поверхні за допомогою природної конвекції при переміщенні трансформаторного масла зростає. При цьому теплопередачею випромінюванням нехтують і вважають

$$\alpha = \alpha_k \approx 110 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (7.9)$$

причому залишається справедлива теоретична залежність (7.8).

Застосування штучної конвекції значно збільшує коефіцієнт теплопередачі з

поверхні, а кількість теплового потоку визначають як

$$Q_k = \alpha \cdot S_k \cdot \Delta\theta \quad (7.10)$$

Доречно зауважити, що формула запису для теплового потоку, відведеного конвекцією і для теплопередачею випромінюванням (7.4), подібні.

Величина коефіцієнта α в загальному випадку залежить від багатьох факторів: теплофізичних властивостей охолоджуючого агента, швидкості і характеру його руху, характеристик охолоджуваної поверхні і т.п. Наприклад, у залежності від швидкості руху та інших факторів $\alpha = 20 \dots 150 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$ для повітряного охолодження, для трансформаторного масла - $\alpha = 200 \dots 600 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$, для води - $\alpha = 1100 \dots 4500 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

У зв'язку з досить широким діапазоном зміни коефіцієнта теплопередачі з поверхні α необхідно точне визначення, що суттєво впливає на достовірність теплових розрахунків. Нижче розглядаються способи визначення коефіцієнта α .

Теплопередача теплопровідністю здійснюється на молекулярному рівні за рахунок коливань молекул. Цей спосіб теплопередачі здійснюється у твердих тілах або у рідких і газоподібних середовищах незначних обсягів, де конвекцією нехтують, тобто немає пересуванням охолоджуючого агента.

Теплопровідні властивості характеризують коефіцієнтом теплопровідності λ , який має розмірність $\frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$ і показує кількість тепла (потужності), яка відводиться через тіло перерізом в один квадратний метр і довжиною в один метр при різниці температур між входом і виходом тепла в один градус Цельсія. Чисельні величини коефіцієнтів теплопровідності наведені в табл. 7.2.

Кількість тепла при теплопередачі теплопровідності визначають як

$$Q_\lambda = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta\theta}{L}, Bm \quad (7.11)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності тіла; S - площа, через яку проходить тепловий потік; L - довжина відрізка шляху теплового потоку.

Для показу напрямку руху теплового потоку використовують вираз для питомого теплового потоку

$$q = \frac{Q}{S} = -\lambda \text{ grad} \Delta\theta = -\lambda \frac{d(\Delta\theta)}{dx} \quad (7.12)$$

де знак мінус показує, що напрямок переміщення теплового потоку від більшого значення температури тіла до меншого значення.

Слід зазначити, що коефіцієнти теплопровідності табл. 7.2 [2] досить точні, тому при тепловому розрахунку їх використання не викликає труднощів [1, 2].

Таблиця 7.2 – Коефіцієнти теплопровідності [2]

Назва матеріалу	Вт/(°С·м)	Назва матеріалу	Вт/(°С·м)
Мідь	380	Дерево поперек волокон	0,11
Алюміній	220	Гетинакс	(0,226—0,276)
Срібло	420	Воздух при 760 мм рт. ст., 40 °С	0,0266
Сталь листовая електро-технічна		Водород при 40 °С	0,190
вдоль слоя:		Вода при 40 °С	0,633
слабелегированная	(48—35)	Трансформаторное масло при 40 °С	0,164
среднелегированная	(30—26)	Изоляция пазовая обмоток якоря машин постоянного тока и ротора асинхронных машин:	
сильнолегированная	(20—19)	классов А, Е	0,10
Сталь листовая електро-технічна:		классов В, F, Н	0,16
поперек слоя	(1,2—0,87)	то же статорных обмоток асинхронных машин:	
с бумажной изоляцией легированная	(4,4—3,1)	классов А, Е, В (некомпаундированная)	0,10
Лакоткань	0,15	классов В (компаундированная), F, Н	0,16
Летеронд	0,23		
Электроизоляционный картон:			
сухой	0,180		
пропитанный в масле	0,250		
Миканит	0,20		
Асбест	0,19		
Эмаль, фарфор	(1,50—1,63)		
Стекло	1,1		

У разі шаруватих твердих тіл (наприклад, пазова ізоляція) користуються еквівалентної провідністю, яка знаходиться з використанням виразів для теплових опорів.

Основні відомості про способи теплопередачі дані в опорному конспекті на рис. 7.6.

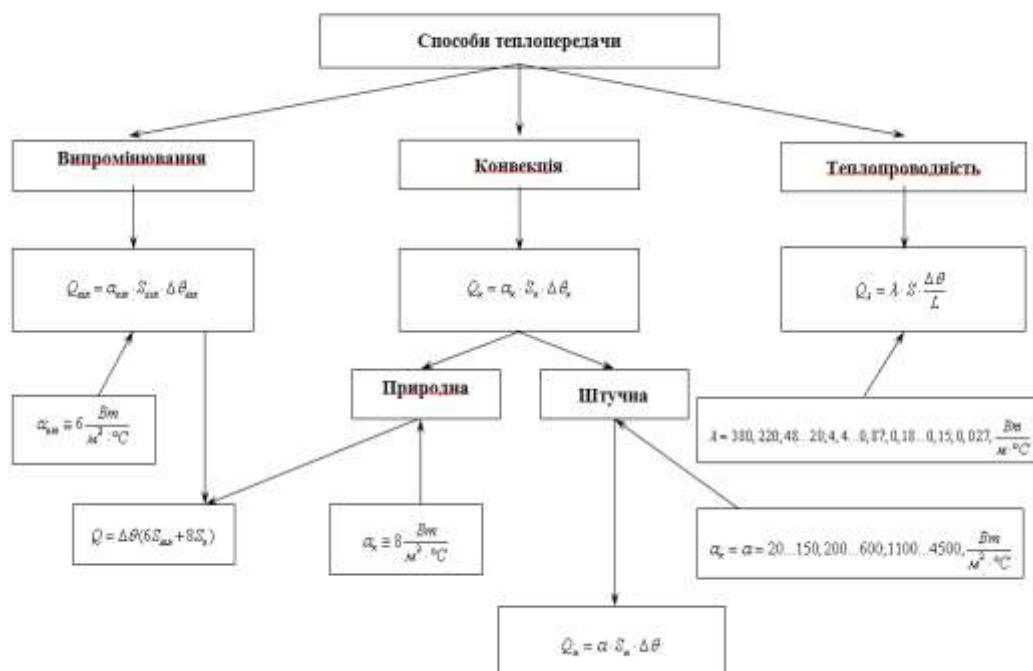


Рис. 7.6. - Способы теплопередачі

7.3. Визначення коефіцієнта теплопередачі з поверхні

У практичних розрахунках використовують коефіцієнт теплопередачі з поверхні α , що враховує всі способи теплопередачі. Прийнята величина коефіцієнта теплопередачі з поверхні істотно впливає на точність теплового розрахунку. Цією обставиною зумовлена необхідність окремого розгляду способів визначення коефіцієнтів α .

Визначення коефіцієнтів теплопередачі з поверхні здійснюють по залежностям, отриманих експериментальним шляхом. При цьому можна виділити два підходи:

1 Визначення коефіцієнтів α на моделях для конкретних умов і поверхонь, а потім, використовуючи теорію подібності, застосовують їх з урахуванням реальних розмірів поверхонь електричної машини за допомогою безрозмірних чисел подібності.

2 Коефіцієнти α визначають за емпіричними формулами або графічним залежностям отриманими експериментальним шляхом для поверхонь конкретних конструкцій і типів електричних машин.

7.3.1. Визначення коефіцієнта α за допомогою безрозмірних чисел подібності

В електричних машинах найчастіше застосовують такі безрозмірні числа подібності:

- Нуссельта (Nu);
- Рейнольдса (Re);
- Прандтля (Pr).

Число Нуссельта характеризує геометрію досліджуваної поверхні і визначається виразом

$$Nu = \alpha \cdot d / \lambda \quad (7.13)$$

де α - коефіцієнт теплопередачі з поверхні, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; d - гідравлічний діаметр охолоджуючого каналу, $м$; λ - теплопровідність охолоджуючого агента, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

Величина гідравлічного діаметра d є основною у (7.13), тому вважають, що число Nu характеризує геометрію охолоджуючої поверхні, для якої його визначають. Це видно з прийнятого гідравлічного діаметра d при різних поперечних перерізах каналів.

Для каналів довільного перерізу з периметром Π і перерізом S гідравлічний діаметр приймають

$$d = 4S / \Pi \quad (7.14)$$

Для каналів, що мають у перерізі коло з діаметром d_k , приймають

$$d = d_k \quad (7.15)$$

Якщо канал має прямокутну форму з розмірами сторін b і h , то гідравлічний діаметр

$$d = 2b \cdot h / (b + h) \quad (7.16)$$

При квадратному перерізі каналу у (7.16) $b = h$ гідравлічний діаметр

$$d = b = h \quad (7.17)$$

Для випадку вузьких прямокутних каналів з $h \gg b$ приймають

$$d \approx 2b \quad (7.18)$$

У випадках охолодження відкритих поверхонь гідравлічний діаметр d приймають рівним довжині L або висоті H цієї поверхні:

$$d = L \text{ або } d = H \quad (7.19)$$

Число Рейнольдса дозволяє визначити характер руху охолоджуючого агента, чисельну величину якого знаходять за формулою

$$Re = \varrho \cdot d / \nu \quad (7.20)$$

де ϱ - швидкість руху, $м/с$; d - гідравлічний діаметр охолоджуючого каналу, що визначається по (7.14)...(7.19), $м$; ν - кінематична в'язкість охолоджуючого агента при відомій температурі, $м^2/с$.

Величина кінематичної в'язкості у (7.20) характеризує внутрішні частки охолоджуючого агента або, іншими словами, властивість охолоджуючого агента чинити опір взаємному зсуву суміжних частинок.

Безпосереднє призначення числа Re полягає у визначенні для конкретного гідравлічного діаметра d характеру руху охолоджуючого агента: ламінарний або турбулентний. Це пов'язано з тим, що величина коефіцієнта теплопередачі α залежить від характеру руху.

На рис. 7.7 показана якісна залежність α в залежності від швидкості та характеру руху охолоджуючого агента

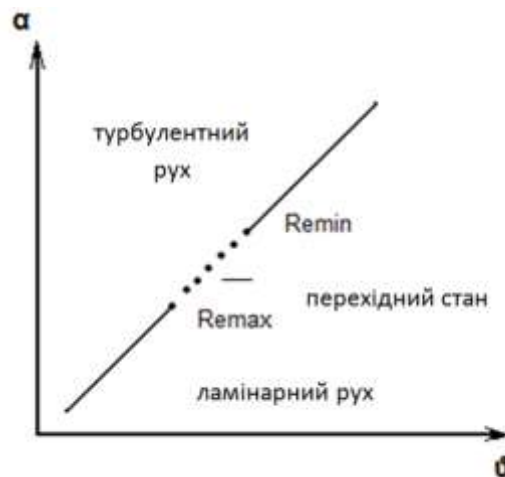


Рис. 7.7.

В області перехідного стану визначати величини коефіцієнта α важко, тому прагнуть створити швидкості пересування охолоджуючого агента над охолоджуваною поверхнею або ламінарними, або турбулентними. У цьому зв'язку величина числа Рейнольдса і визначає характер руху (ламінарний або турбулентний) над досліджуваною охолоджуваною поверхнею. Визначаються це за допомогою відомих з експериментів чисельних значень Re_{max} і Re_{min} (рис. 7.7) для конкретних випадків. Якщо $Re \leq Re_{max}$ - рух ламінарний, якщо $Re > Re_{min}$ - турбулентний. Оцінка характеру руху обов'язкова, тому що вирази (формули) розрахунку числа Нуссельта через числа Рейнольдса і Прандтля визначаються з урахуванням характеру руху навіть для

однієї і тієї ж поверхні.

Число Прандтля характеризує теплофізичні властивості охолоджуючого агента і визначається виразом

$$\text{Pr} = \nu / \alpha \quad (7.21)$$

ν - кінематична в'язкість охолоджуючого агента при відомій температурі, α - температуропровідність.

Чисельна величина температуропровідності визначається з рівності

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \quad (7.22)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності; C_p - питома теплоємність охолоджуючого агента при постійному тиску; ρ - питома густина охолоджуючого агента.

Для електричних машин загального призначення використовують охолоджуючий агент - повітря. Фізичні параметри сухого повітря наведені в таблиці [1.2], дані цієї таблиці дозволяють обчислити величини числа Рейнольдса і Прандтля.

Порядок визначення коефіцієнта теплопередачі з поверхні α , використовуючи безрозмірні числа подібності, полягає в наступному.

1 Для конкретної поверхні (тобто гідравлічного діаметра d), відомих швидкості та кінематичної в'язкості охолоджуючого агента знаходять число Рейнольдса (Re), за величиною якого визначають характер руху: ламінарний або турбулентний.

2 З урахуванням характеру руху вибирають формулу для розрахунку числа Нуссельта (7.13).

3 Якщо в цю формулу входить і число Прандтля, то його обчислюють (7.21).

4 Для прийнятої залежності $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$ знаходять величину числа Нуссельта.

5 Визначають коефіцієнт теплопередачі для розглянутої поверхні

$$\alpha = \lambda \cdot \text{Nu} / d \quad (7.23)$$

де величина числа Нуссельта з пункту 4.

Опорний конспект по безрозмірним числах подібності наведено на рис. 7.8.

Приклади використання безрозмірних чисел подібності для визначення коефіцієнтів теплопередачі з поверхонь стінки і каналу наведені на рис. 7.9.

Рис. 7.8.

Рис. 7.9.

7.3.2. Коефіцієнти тепловіддачі з поверхні існуючих електричних машин

Визначення коефіцієнта теплопередачі для реальних випадків за допомогою безрозмірних чисел подібності вимагає перерахунку коефіцієнтів теплопередачі, знайдених експериментально для макетів.

Разом з тим, існує і другий підхід, який полягає в тому, що на підставі проведених експериментів на існуючих конструкціях електричних машин дають конкретні рекомендації щодо величин коефіцієнтів α . Ці рекомендації пропонують у вигляді емпіричних або графічних залежностей для певних умов, конструкцій і типів еле-

ктричних машин. У цьому випадку проектуванту необхідно адекватно застосувати ці рекомендації до конкретних поверхонь охолодження проектованої машини.

Прикладом емпіричної залежності коефіцієнта теплопередачі з поверхні може служити вираз для випадку обдування нагрітої поверхні повітрям зі швидкістю $5 \dots 25 \text{ м/с}$:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 + K_0 \cdot \mathcal{G}_B) \quad (7.24)$$

де $\alpha_0 = 13,3 \dots 16,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$; $\mathcal{G}_B \approx V_B / S$ - швидкість повітря, м/с ; V_B - витрата або кількість повітря, яка обдуває нагріту поверхню, $\text{м}^3/\text{с}$; K_0 - коефіцієнт, що враховує ефективність обдування; $K_0 = 0,1$ - для зовнішніх поверхонь ротора електричних машин; $K_0 = 0,07 \dots 0,05$ - для поверхонь лобових частин статорних обмоток.

Коефіцієнт теплопередачі з поверхонь якоря і котушок збудження машин постійного струму наближено визначають за формулою

$$\alpha \approx 14 \cdot (1 + 0,8 \cdot \sqrt{\mathcal{G}_a}) \quad (7.25)$$

де $\mathcal{G}_a$ - окружна швидкість якоря, м/с .

В якості прикладу рекомендованих коефіцієнтів теплопередачі з поверхні у вигляді графічних залежностей може служити рис. 7.10.

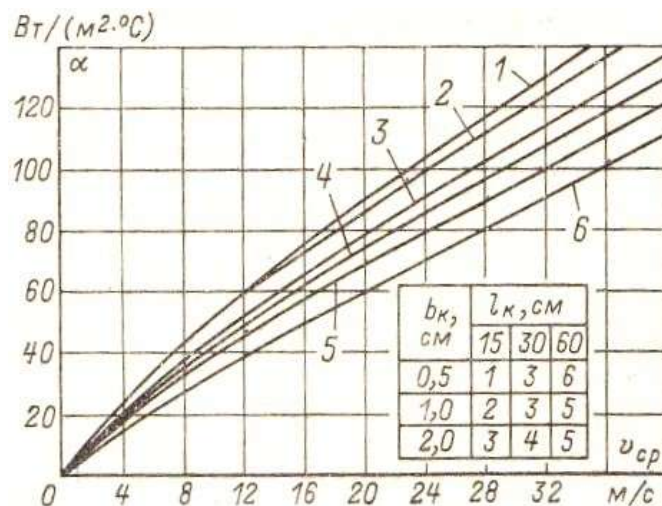


Рис. 7.10. - Коефіцієнти тепловіддачі радіальних каналів: криві 1 - 6 відповідають різним значенням довжин і ширин каналів.

Тут дані криві залежностей α від середньої швидкості для радіальних каналів статора при охолодженні повітрям зі швидкістю його руху $\geq 5 \text{ м/с}$. При цьому враховується ширина і довжина каналів, а середня швидкість руху повітря в каналі $\mathcal{G}_{cp}$ у відсотках від окружної швидкості ротора в залежності від співвідношення аксіальної довжини ротора L до полюсного поділу наведена на рис. 7.11.

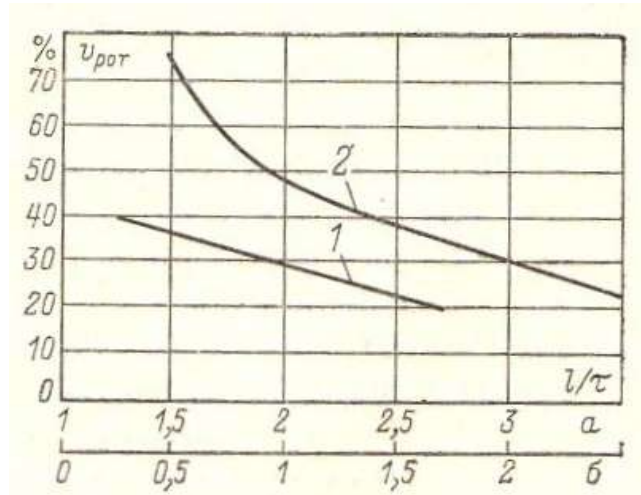


Рис. 7.11. - Середня швидкість повітря у відсотках окружної швидкості ротора:
 1 - у вентиляційних каналах асинхронних машин;
 2 - у вентиляційних каналах явнополюсних машин.

7.4. Нагрівання однорідного тіла

Для загального розуміння процесу нагрівання проведено аналіз для найпростішого випадку - нагрівання однорідного тіла в часі від t_0 до t_∞ . Час t_∞ відповідає часу усталеного процесу нагрівання, тобто перевищення температури тіла над охолоджуючим середовищем $\Delta\Theta_\infty = \text{const}$ і не залежить від часу t . Час t_0 відповідає початку процесу нагрівання від перевищення температури $\Delta\Theta_0$ і виділенню в тілі тепла (втрат) Q .

На підставі закону збереження (балансу) енергії диференціальне рівняння нагрівання тіла для часу dt має вигляд:

$$Q \cdot dt = c \cdot m \cdot d(\Delta\Theta) + \alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta \cdot dt \quad (7.26)$$

де Q - втрати (тепловий потік), що виділяються в тілі і постійні за величиною, Вт ; c - питома теплоємність нагрівання речовини тіла, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; m - маса нагріваючого тіла, кг ; $\Delta\Theta$ - поточне перевищення температури тіла, $^\circ\text{C}$; α - коефіцієнт теплопередачі з поверхні тіла (у загальному випадку випромінюванням і конвекцією), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; S - площа охолодження поверхні тіла, м^2 .

Додаток у правій частині (7.26) $c \cdot m \cdot d(\Delta\Theta)$ відповідає енергії втрат, що йдуть на нагрівання самого тіла, де виділяються втрати.

Додаток у правій частині (7.26) $\alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta \cdot dt$ - відповідає кількості тепла (втрат), відведеного з поверхні тіла у навколишнє середовище.

У сталому режимі нагрівання при $t = t_\infty$ перевищення температури $\Delta\Theta_\infty = \text{const}$ вираз (7.26) приймає вигляд:

$$Q \cdot dt = \alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta \cdot dt \quad (7.27)$$

або

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta \quad (7.28)$$

тобто тепло, яке виділяється в тілі Q , повністю відводиться у навколишнє середовище з поверхні тіла з перевищенням температури $\Delta\Theta = \Delta\Theta_\infty$.

Розв'язання рівняння (7.27) має вигляд:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_0 + (\Delta\Theta_\infty - \Delta\Theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}) \quad (7.29)$$

де $T_n = c \cdot m / (\alpha \cdot S)$ - постійна часу нагрівання (охолодження) однорідного тіла для відомого початкового перевищення температури тіла $\Delta\Theta_0$ над охолоджуваним середовищем (наприклад, навколишнім повітрям).

Рівність (7.29) при $\Delta\Theta < \Delta\Theta_\infty$ описує процес нагрівання, а при $\Delta\Theta_0 > \Delta\Theta_\infty$ - процес охолодження.

Графічно процес нагрівання для $\Delta\Theta_0 = 0$ зображений на рис. 7.12, а для $\Delta\Theta_0 = \Delta\Theta_1$ на рис. 7.13

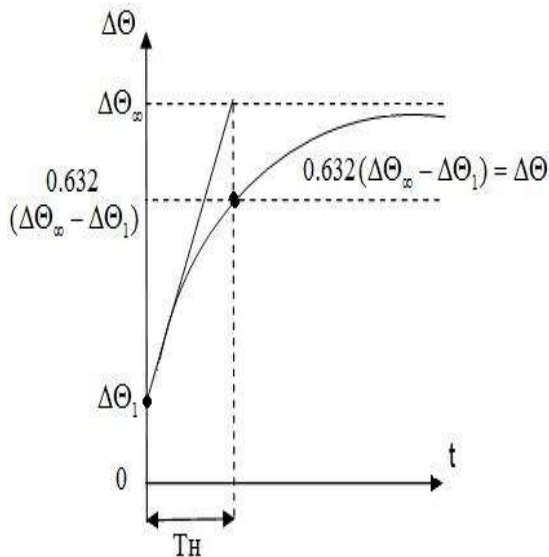


Рис. 7.12. - Для $\Delta\Theta_0 = 0$

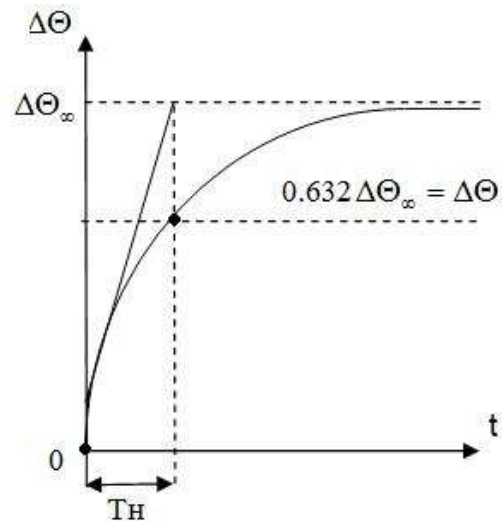


Рис. 7.13. - Для $\Delta\Theta_0 = \Delta\Theta_1$

На рис. 7.14 представлено графічне зображення рівняння (7.29) при охолодженні тіла ($\Delta\Theta_0 > \Delta\Theta_\infty$).

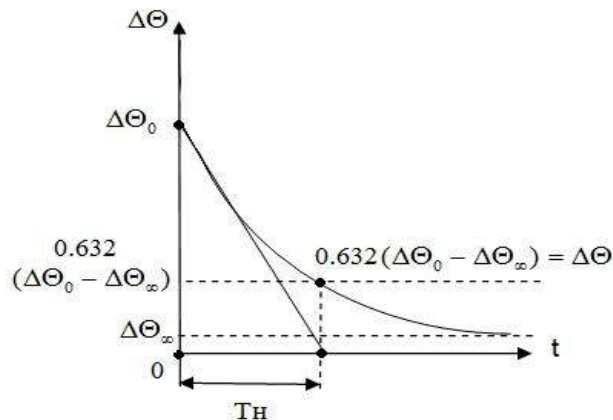


Рис. 7.14. - Для $\Delta\Theta_0 > \Delta\Theta_\infty$

На рис. 7.12, рис. 7.13 і рис. 7.14 показано графічне і розрахункове визначення постійної нагріву T_n , якщо є експериментальна залежність нагрівання тіла. Вважа-

ється, що усталене перевищення температури $\Delta\Theta_{\infty}$ при нагріванні або охолодженні тіла настає через $\approx (3 \div 4)T_n$.

Слід зазначити, що у цілому електрична машина складається з ряду тіл, відинних по теплофізичних властивостях. У цьому зв'язку необхідно складати для кожного тіла рівняння типу (7.26), спільний розв'язок яких громіздкий і складний.

Розрізняють два підходи до розрахунку нагрівання: визначення перевищення температур окремих частинок машини для усталеного стану (стаціонарного) нагрівання і для несталого (або перехідного) режиму нагрівання.

Перевищення температур для усталеного нагріву визначають за допомогою теплових схем заміщення, складання і розрахунків яких розглядається далі.

Розрахунок перевищень температур при несталому процесі нагрівання в даний час проводять за допомогою програм для сучасних комп'ютерів, здатних вирішувати більше 1000 рівнянь. Розгляд таких процесів не входить у завдання цього розділу.

7.5. Теплова схема заміщення

Метою складання і розрахунку теплових схем заміщення є визначення усереднених перевищень температур окремих частин електричної машини. При цьому кожна частина машини розглядається як однорідне тіло, що має однакове теплофізичних властивостей.

Теплові схеми заміщення широко застосовують для сталих процесів нагрівання, що істотно полегшує розрахунки. Реально мають місце нерівномірний розподіл температур в об'ємі конкретних однорідних частин машин (місцеві перегріву), їх враховують шляхом зниження припустимих величин перевищення температур, які вказує міждержавний стандарт ГОСТ 183-74Е, табл. 7.1.

При складання теплових схем заміщення використовують поняття: джерело тепла (або втрат) і тепловий опір.

Джерела тепла представляють місцем (точкою), де зосереджують суму всіх розподілених втрат у конкретній частині машини, якою вважають як однорідне тіло. Розташовують цю суму втрат у найбільш нагрітій точці розглянутої частини конструкції машини. Наприклад, втрати в міді пазової частини обмотки статора зосереджують по середині активної довжини і у центрі паза.

Теплові опори характеризують теплофізичні властивості ділянок, через які відводиться тепло (втрати). У загальному випадку розрахунок теплових опорів здійснюють в залежності від способу теплопередачі по двох формулах.

При теплопередачі теплопровідністю тепловий потік

$$Q_{\lambda} = \lambda \cdot S \cdot \Delta\Theta / L \text{ Вт}, \quad (7.30)$$

звідки

$$\Delta\Theta = Q_{\lambda} \cdot L / (\lambda \cdot S) = Q_{\lambda} \cdot R_{\lambda} \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (7.31)$$

а тепловий опір при теплопередачі теплопровідністю

$$R_{\lambda} = \frac{L}{\lambda \cdot S} \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{Вт}, \quad (7.32)$$

де L - довжина ділянки; λ - питома теплопровідність; S - площа, через яку проходить

тепловий потік.

Аналогічно при теплопередачі з поверхні

$$Q_{\alpha} = \alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta \text{ Вт}, \quad (7.33)$$

і тепловий опір при теплопередачі з поверхні

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot S} \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{Вт}, \quad (7.34)$$

Попередньо вказавши розташування зосереджених джерел тепла, напрямки теплопередачі та визначивши ділянки, де передача тепла здійснюється конкретним видом теплопередачі і при однакових теплофізичних властивостях, знаходять теплові опори. Потім, слідуючи напрямку теплопередачі до охолоджуючого середовища, послідовно з'єднують джерела тепла і теплові опори ділянок.

При визначенні (розрахунку) перевищень температур окремих точок (або вузлів) в тепловій схемі використовують ті ж закони, що і у електричних схемах, тобто використовують закони Ома і Кірхгофа. У цьому випадку використовують наступну аналогію.

Електрична схема:

U - напруга, В

I - струм, А

$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$ електричний опір, Ом

Теплова схема:

$\Delta\Theta$ - перевищення температури, $^{\circ}\text{C}$

P - зосереджені втрати, Вт

$R_{\lambda} = L / (\lambda S)$
 $R_{\alpha} = 1 / (\alpha \cdot S)$ } - тепловий опір, $^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$

Тоді закон Ома для ділянки теплової схеми на рис. 7.15 має вигляд:

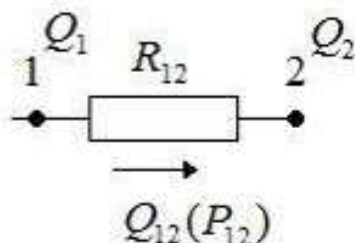


Рис. 7.15. - Теплова схема по закону Ома

$$\Theta_1 - \Theta_2 = Q_{12} \cdot R_{12} = P_{12} \cdot R_{12} \quad (7.35)$$

де Θ_1 і Θ_2 - температури між точками (вузлами) 1 і 2; Q_{12} - тепловий потік від точки 1 до 2; R_{12} - тепловий опір між точкою 1 і 2.

Закон Кірхгофа для вузла на рис. 7.16 має вигляд:

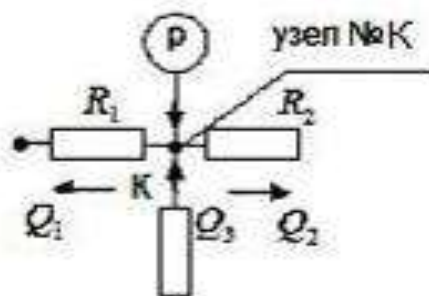


Рис. 7.16. - Закон Ома для вузла

$$P + Q_3 = Q_1 + Q_{21} \quad (7.36)$$

де P - джерело тепла (еквівалентне джерело струму); Q_1, Q_2, Q_3 - спрямовані теплі потоки.

Для складеної теплової схеми нумерують точки (вузли), де необхідно визначити перевищення температури, і теплові опори між ними. Далі розставляють ймовірні напрямки теплових потоків, нумерують їх, і складають систему рівнянь. Кількість рівнянь, дорівнює сумі чисел вузлів і теплових потоків.

Розв'язання рівнянь, складених для теплових схем, здійснюють тими ж способами, що і для електричних схем. При бажаному спрощення виду теплової схеми заміщення заміна послідовно і паралельно з'єднаних теплових опорів еквівалентними здійснюються так само, як і в електричних колах.

Якщо у результаті розрахунку тепловий потік на якій-небудь i -тій ділянці отриманий з від'ємним знаком, то це означає, що його напрямок (теплопередача), протилежний прийнятому у схемі.

Розраховані по тепловій схемі перевищення температур окремих частин машини $\Delta\Theta_i$, необхідно скласти з половиною різниці температур $0,5 \cdot \Delta\Theta_{az}$ між гарячим охолоджуючим агентом $\Theta_{z,az}$ на виході у навколишнє середовище і холодним на вході $\Theta_{x,az}$ з навколишнього середовища.

$$0,5 \cdot \Delta\Theta_{az} = \Theta_{z,az} - \Theta_{x,az} \quad (7.37)$$

Для повітряного охолодження перегрів охолоджуючого повітря

$$\Delta\Theta_{az} = \frac{V \cdot c}{K_{\Sigma} \cdot \Sigma p} \quad (7.38)$$

де V - витрата повітря $м^3/с$; $c = 1100 \text{ Дж}/(м^3 \cdot ^\circ\text{C})$ - теплоємність повітря; Σp - сумарні втрати в машині, Вт; K_{Σ} - коефіцієнт ефективності обдуву.

Остаточне середнє перевищення температури i -тій частині машини $\Delta\Theta_j$ над навколишнім середовищем визначають як суму:

$$\Delta\Theta_j = \Delta\Theta_i + 0,5 \cdot \Delta\Theta_{az} \quad (7.39)$$

Величина $\Delta\Theta_j$ не повинна перевищувати припустиму величину для конкретних частин машини та класу нагрівостійкості, що встановлює вимога міждержавного стандарту ГОСТ 183-74Е:

$$\Delta\Theta_j \leq \Delta\Theta_{j \text{ доп}} \quad (7.40)$$

Якщо вимога (7.40) не виконується, то необхідно внести поправки у вентиляційний розрахунок з метою збільшення витрати повітря V і напору вентилятора H шляхом застосування (або розрахунку) більш ефективного вентилятора. Це дозволить збільшити швидкості руху повітря (у загальному випадку охолоджуючого агента) і підвищити величини коефіцієнтів теплопередачі з поверхні α , а значить до зменшення теплових опорів R_{α} і зниження перепадів (перевищень) температур.

Опорний конспект по складанню і порядку розрахунку теплових схем заміщення наведено на рис. 7.17.

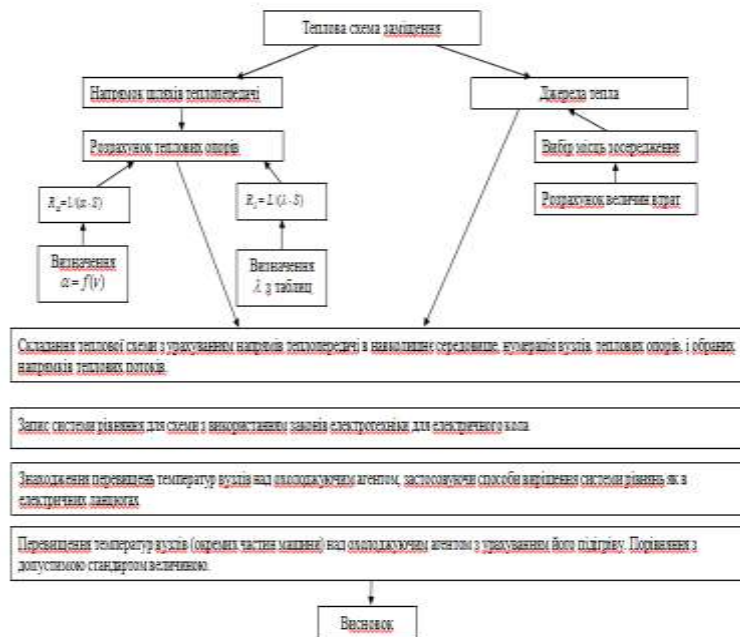


Рис. 7.17.

7.6. Приклад складання теплової схеми заміщення

На рис. 7.18 наведена конструкція серійного двигуна 4А з висотою обертання 160 мм і ступенем захисту IP44, для якого нижче пропонується скласти теплову схему заміщення.

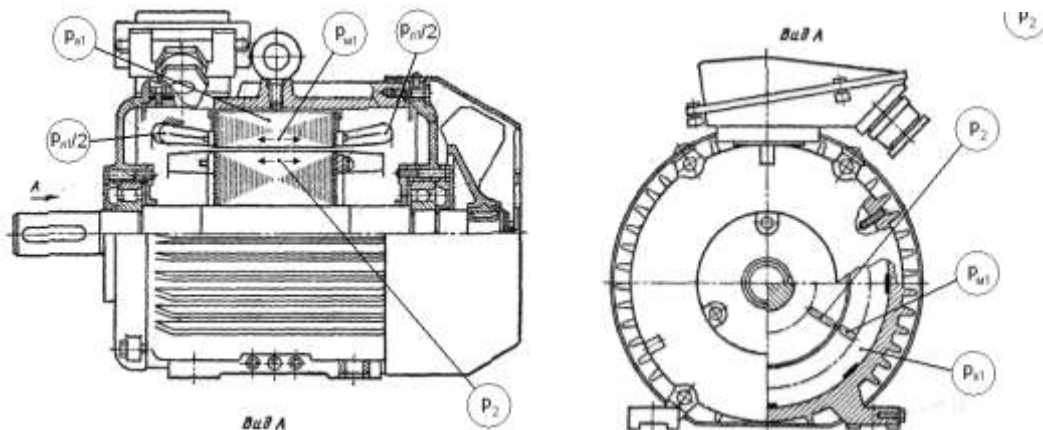


Рис. 7.18. - АД серії 4А

Слідуючи викладеному порядку складання теплової схеми заміщення, визначають види втрат і їх місце виділення. Загальновідомо, що в асинхронній машині виділяються втрати, які проявляються у вигляді нагріву, тобто є джерелами тепла. До них відносять втрати у міді обмотки статора, у сталі магнітопроводу статора, у к.з. обмотці ротора, механічні та додаткові. Для отримання більш простої схеми заміщення механічні втрати додають до втрат обмоток ротора, а додатковими нехтують.

Для розглянутої конструкції прийняті і зосереджені у вигляді джерел тепла наступні втрати:

- втрати у пазовій частини обмотки статора p_{M1} , які зосереджені по середині

активної довжини статора і в центрі паза;

- втрати у лобових частинах всієї обмотки статора $p_{л1}$, які зосереджені по середині довжини лобовій частині (односторонньої);

- втрати у сталі магнітопроводу статора (зубців і ярма) $p_{А1}$, які зосереджені посередині пакету статора і середині висоти ярма;

- втрати у к.з. обмотці ротору p_2 , які зосереджені по середині довжини стрижня і по середині перерізу стрижня;

- втрати механічні включені у втрати к.з. обмотки ротору.

Далі необхідно вказати шляхи (напрямки) теплопередачі, або напрямки теплових потоків.

- втрати у к.з. обмотці p_2 , які зосереджені по середині довжини стрижня і по середині перерізу стрижня;

- втрати механічні включені у втрати к.з. обмотки ротору.

Далі необхідно вказати шляхи (напрямки) теплопередачі, або напрямки теплових потоків.

Очевидно, що визначає термічну міцність найбільш нагріта частина обмотка статора. Втрати (тепло), що виділяється в ній, визначає напрямок руху теплового потоку. Таких напрямів два:

- з пазової частини до лобових частин (до точки зосередження втрат в лобових частинах) Q_{12} , при цьому між джерелами тепла $p_{М1}$ і $p_{л1}$ існує деяка різниця температур $Q_1 - Q_2$ залежна від теплового опору R_{12} . Опору характерна теплопередача по міді провідників теплопровідністю;

- з пазової частини в ярмо магнітопроводу (до точки зосередження втрат у сталі) Q_{23} , по цьому напрямку має місце різниця температур $Q_1 - Q_3$. Ця теплопередача у сталі теплопровідністю обумовлює опір R_{13} .

Ці два напрями теплопередачі вже можна уявити фрагментом теплової схеми заміщення із зазначенням вузлів і напрямів теплових потоків між ними, рис. 7.19.

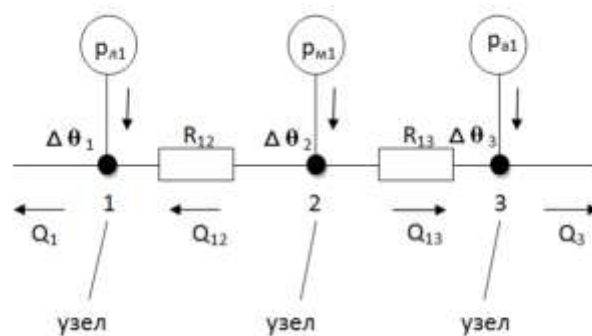


Рис. 7.19.

На практиці звичайно не виділяють вузли як на рис. 7.19, а прийнято зображати згідно з рис. 7.20.

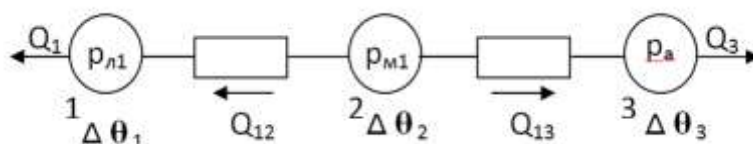


Рис. 7.20.

З рис. 7.19 і рис. 7.20 випливає, що частина потоку (втрат) з пазової частини обмотки Q_{12} сумується з тепловим потоком (втратами) лобової частини, створюючи тепловий потік Q_1 :

$$Q_1 = p_{11} + Q_{12} \quad (7.41)$$

Тепловий потік Q_1 надходить у повітря навколо лобових частин обмотки, тобто у середину машини. При цьому має місце перепад температур в ізоляції лобових частин і між поверхнею лобових частин і оточуючих їх внутрішнім повітрям машини. У даному випадку має місце теплопередача провідністю і конвекцією. Для кожного з цих способів теплопередачі необхідно знайти теплові опори, а потім їх скласти. Позначимо це сумарним опором R_1 .

У внутрішній повітря машини також надходить втрати к.з. ротора p_2 , які підсумовуються з тепловим потоком Q_1 , створюючи сумарний тепловий потік

$$Q_4 = p_2 + Q_1 \quad (7.42)$$

Тепловий потік Q_4 передається конвекцією до внутрішніх стінок корпусу, при цьому перепад температур $\Delta\theta_4$ залежить від теплового опору R_4 . Нехтуючи перепадом температур в корпусі (станині), тепловий потік Q_4 надходить за допомогою конвекції в навколишнє середовище, за умови наявності перепаду температури на поверхні, яка визначається R_5 . В результаті, теплопередача від лобових частин до навколишнього середовища може бути представлена фрагментом схеми заміщення на рис. 7.21.

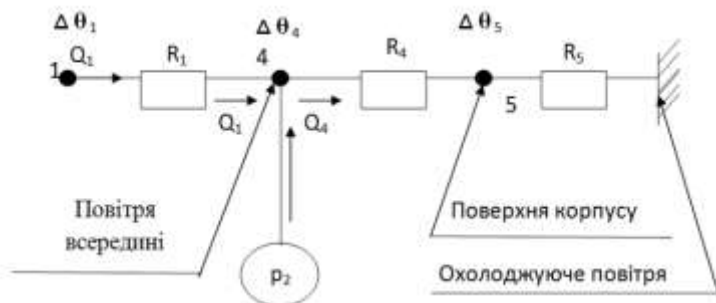


Рис. 7.21.

Пряме включення втрат у роторі p_2 до вузла 4 зроблено, нехтуючи необхідністю знаходження перевищень температур частин к.з. ротора. Це обумовлено тим, що найбільший припустимий нагрів визначають для обмотки статора, при цьому навіть свідомо більш висока температура частин ротора не вплине на термічну міцність машини в цілому.

Другий напрям теплопередачі частини теплового потоку пазової частини обмотки до сталі магнітопроводу, сумуючись з втратами в сталі p_a згідно рис. 7.19 і рис. 7.20, обумовлює тепловий потік

$$Q_3 = Q_{12} + p_a \quad (7.43)$$

Тепловий потік Q_3 можливий за рахунок різниці температур від точки концентрації втрат p_a до поверхні корпусу. Теплопередача в даному випадку здійснюється теплопровідністю уздовж листів електротехнічної сталі і товщини станини. Теп-

ловий опір цієї ділянки позначимо R_3 .

Зауважимо, що теплопередачею поперек листів електротехнічної сталі знехтувано, оскільки питома теплопровідність в цьому напрямку на порядок нижче ніж уздовж листів, а значить тепловий опір на порядок вище, що значно зменшує теплопередачу в цьому напрямку.

Тепловий потік Q_3 далі з поверхні корпусу (вузол 5 на рис. 7.21) способом конвекції надходить у охолоджуючий повітря, причому перепад температур поверхні - охолоджуюче повітря визначається вже відомим опором R_5 .

Другий напрямок теплопередачі можна уявити фрагментом схеми заміщення на рис. 7.22.

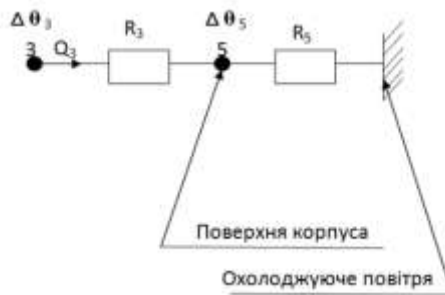


Рис. 7.22.

Повністю теплова схема для розглянутого випадку наведена на рис. 7.23.

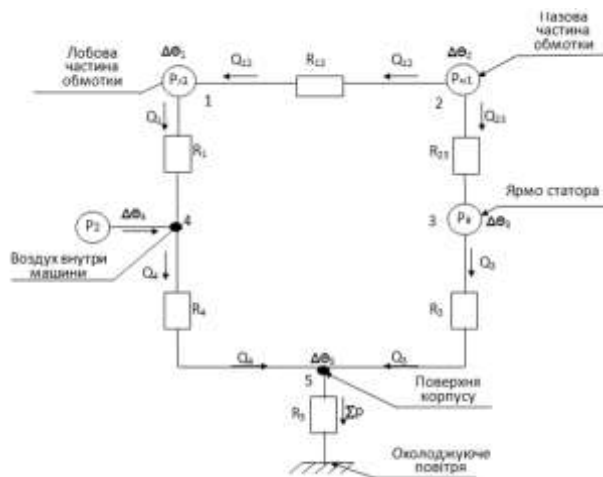


Рис. 7.23.

Вона отримана шляхом з'єднання у ціле фрагментів на рис. 7.20, рис. 7.21 і рис. 7.22. Обидва напрямки теплових потоків сходяться у вузлі 5 (корпус статора), тому що температура нагріву корпусу для цих потоків однакова.

Подальшим завданням є визначення перевищень температур у вузлах 1...5 над охолоджуючим повітрям, попередньо обчисливши з урахуванням особливостей ділянок теплові опори і вважаючи відомими величини втрат джерел тепла.

Розв'язок завдання здійснюють складанням системи рівнянь, з яких знаходяться перевищення температур $\Delta\theta_i$ у відповідних вузлах.

Схема має невідомими 5 перевищень температур та 5 теплових потоків Q . Разом система повинна мати 10 рівнянь. Для складання рівнянь скористаємося першим законом Кірхгофа і законом Ома для ділянки кола стосовно до теплової схемою заміщення. Наприклад, для вузла 1 закон Кірхгофа прийме вигляд:

$$Q_1 - Q_{12} = p_{n1} \quad (7.44)$$

Аналогічно закон Ома для ділянки між 1-им і 2-им вузлами записують як

$$Q_{12} \cdot R_{12} = \theta_2 - \theta_1 \quad (7.45)$$

Подібним чином записують вирази для інших вузлів і ділянок, отримуючи систему рівнянь (7.46)

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{12} = p_{n1}; \\ Q_{12} + Q_{23} = p_{n1}; \\ Q_3 - Q_{23} = p_{n2}; \\ Q_4 - Q_1 = p_{n2}; \\ Q_4 + Q_3 = Sp; \\ Q_{12} \cdot R_{12} = \Delta \theta_2 - \Delta \theta_1; \\ Q_1 \cdot R_1 = \Delta \theta_1 - \Delta \theta_4; \\ Q_4 \cdot R_4 = \Delta \theta_4 - \Delta \theta_5; \\ Q_{23} \cdot R_{23} = \Delta \theta_2 - \Delta \theta_3; \\ Q_3 \cdot R_3 = \Delta \theta_3 - \Delta \theta_5; \end{array} \right. \quad (7.46)$$

Розв'язок цих рівнянь методом Гауса (підстановки) визначають перевищення температур у вузлах, додавши до них половину температури підігріву охолоджуючого повітря середовища (половина різниці між гарячим вихідних і холодним вхідним)

$$0,5(Q_{z.g.} - Q_{x.g.}) \quad (7.47)$$

Остаточні знайдені перевищення з урахуванням (7.47) не повинні бути більш припустимих значень, як правило, для обмотки статора.

Для знаходження перевищень температур по тепловим схемам заміщення можуть використовуватись і інші методи розрахунків, наприклад, метод вузлових потенціалів, що дозволяє зменшити кількість рівнянь.

7.7. Застосування методу вузлових потенціалів для розрахунку теплових схем заміщення

У загальному випадку, для розрахунку теплових схем заміщення можливо використовувати усі методи, які застосовують для розрахунків електричних схем. Для розглянутої теплової схеми на рис. 7.23 у попередньому параграфі можливо застосувати метод вузлових потенціалів, форма запису рівнянь якого більш компактна і зручна для обчислень за допомогою комп'ютера. Метод вузлових потенціалів не вимагає зміни прийнятої конфігурації теплової схеми заміщення (наприклад, для рис. 7.23), але вимагає замість теплових опорів застосувати теплові провідності, які визначають в загальному випадку як

$$\lambda_i = 1/R_i \quad (7.48)$$

Після заміни теплових опорів тепловими провідностями теплова схема заміщення рис. 7.23 прийме вигляд рис. 7.24.

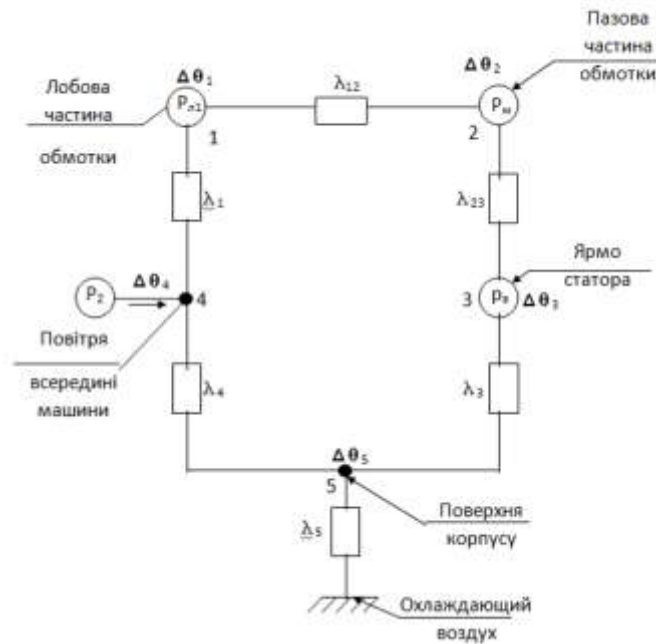


Рис. 7.24. - Теплова схема з тепловими провідностями

Виходячи з рис. 7.24, сформована система рівнянь в матричному вигляді методом вузлових потенціалів (7.49).

1	2	3	4	5				
$l_1 + l_{12}$	$-l_{12}$	0	$-l_1$	0	$\times$	$\begin{vmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \end{vmatrix}$	$=$	p_{l1}
$-l_{12}$	$l_{12} + l_{23}$	$-l_{23}$	0	0				p_{m1}
0	$-l_{23}$	$l_{23} + l_3$	0	$-l_3$				p_a
$-l_1$	0	0	$l_1 + l_4$	$-l_4$				p_2
0	0	$-l_3$	$-l_4$	$l_4 + l_3 + l_5$				0

(7.49)

До знайдених величин перевищень температур необхідно додати половину температури підігріву охолоджуючого повітря навколишнього середовища (7.47).

7.8. Уточнена теплова схема заміщення

Наведена теплова схема на рис. 7.24 може бути уточнена введенням більшої кількості джерел тепла та додаткових теплових зв'язків. Зокрема на практиці для теплового розрахунку усталеного режиму роботи (S1) асинхронного двигуна серії 4А з віссю обертання до 250 мм включно і ступенем захисту IP44 використовують схему заміщення на рис. 7.25 [5].

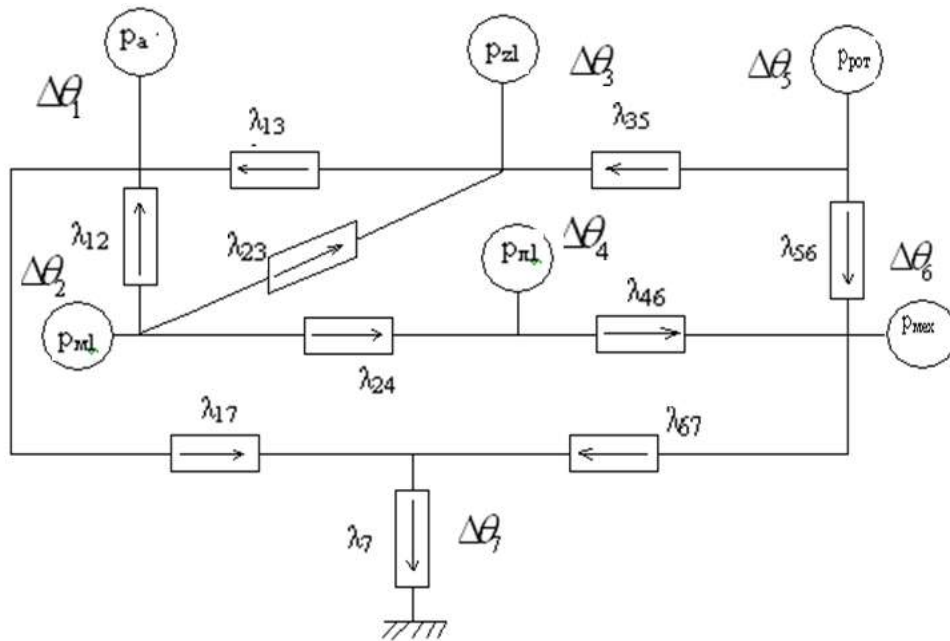


Рис. 7.25. - Теплова схема для АД з IP44

У схемі заміщення на рис. 7.25 прийняті джерела тепла (втрат) та місця їх зосередження:

- p_{M1} - втрати у міді пазової частини обмотки статора, зосереджені по центру паза і середині довжини пакета статора двигуна;
- $p_{л1}$ - втрати у міді лобової частини обмотки статора, зосереджені по середині товщини і довжини лобової частини;
- p_a - втрати у сталі ярма статора, зосереджені по середині висоти ярма і довжини пакету статора двигуна;
- p_{z1} - втрати у сталі зубців статора (туди ж можна включити поверхневі і пульсаційні втрати статора), зосереджені по середині висоти, ширини і довжини зубця статора двигуна;
- p_{rot} - втрати у к.з. обмотці ротора (туди ж можна включити поверхневі і пульсаційні втрати ротора), зосереджені по центру і середині довжини к.з. стрижня обмотки ротора;
- $p_{мех}$ - втрати механічні (на тертя і аеродинамічні), зосереджені і внесені у повітря всередині двигуна.

На схемі заміщення показані основні напрями теплових потоків і теплові провідності на шляху відповідних теплових потоків:

- λ_{12} - сумарна теплова провідність між пазовою частиною обмотки і спинкою статору;
- λ_{13} - теплова провідність між зубцями і спинкою осердя;
- λ_{23} - сумарна теплова провідність між пазовою частиною обмотки і зубцями сердечника статора;
- λ_{24} - теплова провідність між пазової і лобовий частинами обмотки статора;
- λ_{35} - сумарна теплова провідність повітряного проміжку між статором і ротором;
- λ_{46} - сумарна провідність лобової частини обмотки статора до навколишньо-

го повітря усередині машини;

- λ_{56} - сумарна теплова провідність лобових частин обмотки ротору до повітря усередині машини;

- λ_{67} - сумарна теплова провідність повітря всередині машини до оболонки (станини);

- λ_7 - сумарна теплова провідність оболонки статора до навколишнього середовища.

Детальний обчислення зазначених теплових провідностей детально зазначено у [5].

Використовуючи метод вузлових потенціалів, складена система рівнянь для визначення перевищень температур окремих частин (вузлів) асинхронного двигуна в сталому режимі відповідно до схеми заміщення на рис. 7.25.

Повне перевищення окремих частин (вузлів) знаходять шляхом додавання перевищень температур, знайдених при вирішенні складеної системи рівнянь, і половини перевищення температури охолоджуючого повітря над навколишнім середовищем. При цьому повне перевищення температури, зокрема обмотки, не повинно перевищувати значень, встановлених міждержавним стандартом ГОСТ 183-74Е.

Нижче наведена система рівнянь.

$$\begin{pmatrix}
 \lambda_{12} + \\
 + \lambda_{13} + \\
 + \lambda_{17}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 -\lambda_{12} & -\lambda_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\lambda_{12} & \begin{pmatrix} \lambda_{12} + \\ + \lambda_{23} + \\ + \lambda_{24} \end{pmatrix} & -\lambda_{23} & -\lambda_{24} & 0 & 0 \\
 -\lambda_{13} & -\lambda_{23} & \begin{pmatrix} \lambda_{13} + \\ + \lambda_{35} + \\ + \lambda_{23} \end{pmatrix} & 0 & -\lambda_{35} & 0 \\
 0 & -\lambda_{24} & 0 & \begin{pmatrix} \lambda_{24} + \\ + \lambda_{46} \end{pmatrix} & 0 & -\lambda_{46} \\
 0 & 0 & -\lambda_{35} & 0 & \begin{pmatrix} \lambda_{35} + \\ + \lambda_{56} \end{pmatrix} & -\lambda_{56} \\
 0 & 0 & 0 & -\lambda_{46} & -\lambda_{56} & \begin{pmatrix} \lambda_{56} + \\ + \lambda_{46} + \\ + \lambda_{67} \end{pmatrix} \\
 -\lambda_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{67} & \begin{pmatrix} \lambda_7 + \\ + \lambda_{17} + \\ + \lambda_{67} \end{pmatrix}
 \end{pmatrix}
 \times
 \begin{pmatrix}
 \Delta\theta_1 \\
 \Delta\theta_2 \\
 \Delta\theta_3 \\
 \Delta\theta_4 \\
 \Delta\theta_5 \\
 \Delta\theta_6 \\
 \Delta\theta_7
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 p_a \\
 p_{m1} \\
 p_{z1} \\
 p_{л1} \\
 p_p \\
 p_{Mex} \\
 0
 \end{pmatrix}$$

7.1. Теплова схема заміщення асинхронного двигуна з корокозамкнутим ротором серії 4А зі ступенем захисту IP23 і висотою осі обертання від 160 до 250 мм включно

Особливістю охолодження таких двигунів є те, що охолоджуюче повітря безпосередньо проходить у машину, одночасно охолоджуючи статор і ротор. Вважаючи роздільним і незалежним охолодження статора і ротора, теплова схема складається тільки для статора, обмотка котрого є визначальною ланкою термічної міцності асинхронного двигуна.

Враховуючи це, на рис. 7.26 наведена теплова схема заміщення для статора.

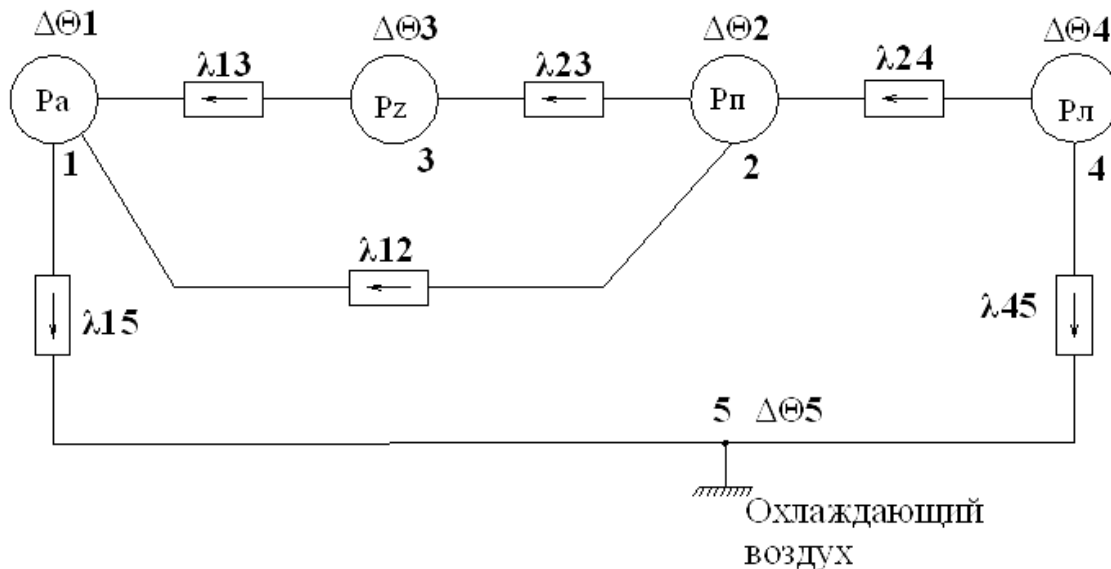


Рис. 7.26. - Теплова схема заміщення для статора

На рис. 7.26 прийняті джерела тепла (втрат) та місця їх зосередження:

- p_n - втрати у міді пазової частини обмотки статора, зосереджені по центру паза і середині довжини пакета статора двигуна;
- p_l - втрати у міді лобової частини обмотки статора, зосереджені посередині товщини і довжини лобовій частині;
- p_a - втрати у сталі ярма статора, зосереджені по середині висоти ярма і довжини пакету статора двигуна;
- p_z - втрати у сталі зубців статора (туди ж можна включити поверхневі і пульсаційні втрати статора), зосереджені посередині висоти, ширини і довжини зубця статора двигуна.

На схемі заміщення пронумеровані вузли, вказані напрямки теплопередачі і теплові провідності для відповідних теплових потоків.

Використання теплових провідностей дозволяє застосувати для складання рівнянь досить простий метод вузлових потенціалів з метою знаходження перевищень температур окремих вузлів конструкції двигуна над охолоджуючим повітрям. Наведена нижче розшифровка позначень прийнятих провідностей у схемі рис. 7.26:

- λ_{12} - сумарна теплова провідність між пазовою частиною обмотки (за напрямком до дна паза) і спинкою статора;
- λ_{13} - теплова провідність між зубцями і спинкою осердя статора (вздовж листів сталі);
- λ_{24} - теплова провідність між пазовою і лобовою частинами обмотки (по міді провідників);
- λ_{23} - сумарна теплова провідність між пазовою частиною обмотки і зубцями (у напрямку до стінок) осердя статора;
- λ_{45} - сумарна теплова провідність лобової частини обмотки статора до охолоджуючого повітря;
- λ_{15} - сумарна теплова провідність між осердям статора і охолоджуючим повітрям.

Згідно зі схемою заміщення на рис. 7.26 система рівнянь має вигляд.

$$\begin{pmatrix} \lambda_{15} + \lambda_{13} + \lambda_{12} & -\lambda_{12} & -\lambda_{13} & 0 & -\lambda_{15} \\ -\lambda_{12} & \lambda_{12} + \lambda_{23} + \lambda_{24} & -\lambda_{23} & -\lambda_{24} & 0 \\ -\lambda_{13} & -\lambda_{23} & \lambda_{13} + \lambda_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_{24} & 0 & \lambda_{24} + \lambda_{45} & -\lambda_{45} \\ -\lambda_{15} & 0 & 0 & -\lambda_{45} & \lambda_{15} + \lambda_{45} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_a \\ p_n \\ p_z \\ p_n \\ 0 \end{pmatrix}$$

До знайдених перевищенням температур вузлів необхідно додати половину температури нагріву охолоджуючого повітря. Сумарні перевищення температур відповідають перевищенню над навколишнім середовищем і не повинні бути більш припустимих величин, зокрема, для обмотки статора.

7.2. Теплова схема заміщення асинхронного двигуна типу ДАЗО (для самостійної роботи).

На рис. 7.27 наведені поздовжній і поперечний розрізи асинхронного двигуна з к.з. ротором типу ДАЗО. Аббревіатура розшифровується: Д- двигун, А- асинхронний, З- закритий, О- обдувається.

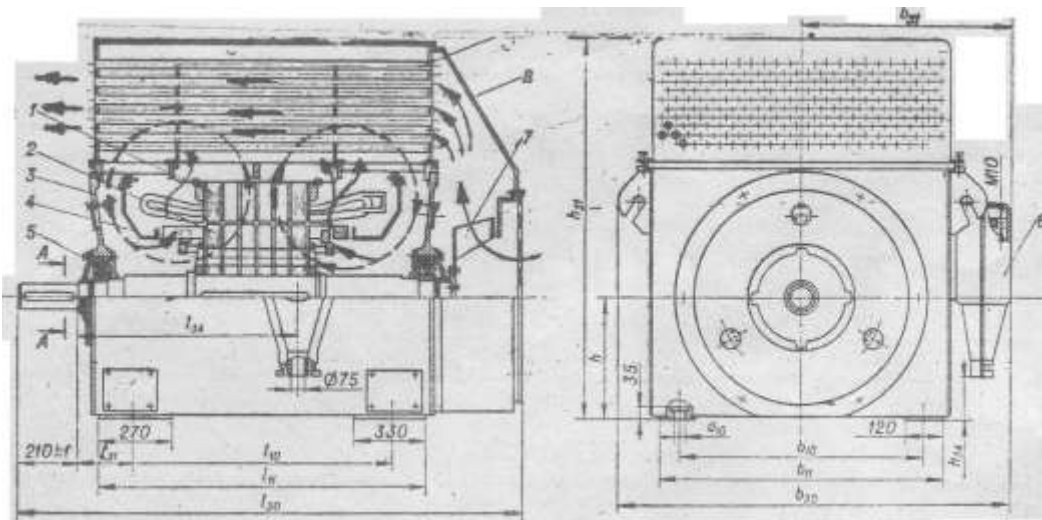


Рис. 7.27. - АД типу ДАЗО

Внутрішня система вентиляції складається з двох симетричних схем, що дозволяє розглянути напрям переміщень повітря для половини поздовжнього розрізу машини, рис. 7.27.

Розглянутий двигун має два циклу вентиляції: внутрішній і зовнішній.

Переміщення повітря у середині машини забезпечується двома пристроями: лопатками к.з. кільця ротора і розпірками (вітреницями) між пакетами осердя ротора 2. Повітря лопатками к.з. кільця відкидається до внутрішньої поверхні лобових частин обмотки статора 1, проходить через отвори між провідниками (обмотка жорстка) і далі омиває труби охолоджувача 9 (ряд труб, через які продувається повітря). До труб охолоджувача надходить повітря радіальних каналів статора, що нагнітається за рахунок вентиляційного ефекту розпірок між пакетами осердя ротора 2.

Обидві струменя гарячого повітря з'єднуються і охолоджуються за рахунок передачі тепла поверхні холодних труб охолоджувача. Охолоджене повітря від труб

На рис. 7.28 наведена теплова схема двигуна типу ДАЗО. Пропонується самостійно розібратися у призначенні окремих елементів цієї схеми.

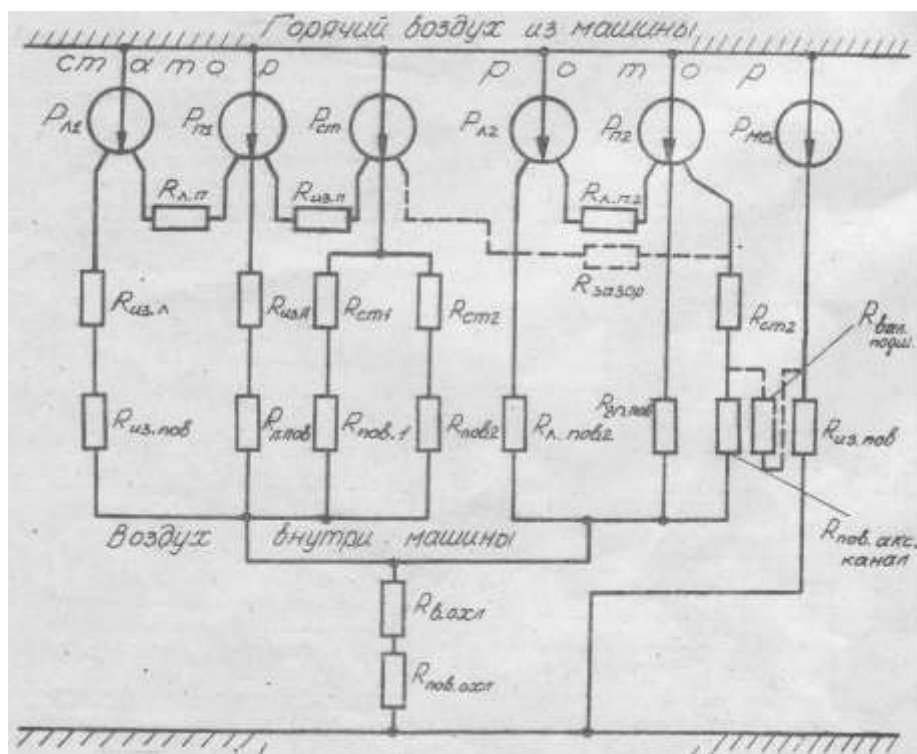


Рис. 7.28. - Теплова схема двигуна типу ДАЗО

7.3. Спрощені оцінки нагрівання електричних машин

Оцінка теплового стану в процесі проектування дуже важлива, тому що вона дозволяє оцінити картину теплової напруженості окремих частин і наперед вжити заходів, наприклад, при виборі щільності струму в обмотках, кількості охолоджую-

чих каналів і конфігурації окремих конструктивних вузлів.

Широке застосування спрощені формули отримали завдяки практиці проектування, де накопичено великий досвід.

В основному спрощені формули визначають перепад і перевищення температур:

- у ізоляції паза якірної (статорної) обмотки;
- зовнішньої поверхні якоря над охолоджуючим повітрям;
- поверхні лобових частин обмотки якоря над охолоджуючим повітрям;
- обмотки якоря над охолоджуючим повітрям;(середнє);
- поверхні обмотки збудження машин постійного струму над охолоджуючим повітрям.

Існуючі рекомендовані припустимі перевищення і перепади температур дозволяють попередньо оцінити тепловий стан окремих ділянок конструкції та у разі потреби вжити відповідних заходів на проміжній стадії проектування, не доводячи до перерахунку всього комплексу розрахунків.

7.4. Перепад температури в ізоляції обмотки якоря

Використовуючи загальні принципи розрахунку теплових схем заміщення, отримують вираз для визначення перепаду температур в ізоляції пазу якірної обмотки будь-якої конструкції.

Для отримання виразу розглядають спрощений фрагмент пазу довжиною в 1 метр, рис. 7.29.

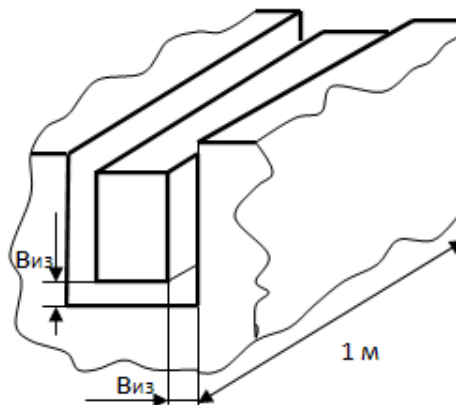


Рис. 7.29. - Спрощений фрагмент пазу

Скориставшись поняттям теплового опору, перепад в ізоляції пазу товщиною $b_{из}$ можна записати у вигляді:

$$\Delta\theta = p' \cdot R_{из n} \quad (7.50)$$

де p' - величина втрат у міді пазу на відстані 1м; $R_{из n}$ - тепловий опір ізоляції пазу на рис. 7.29.

Величину втрат у міді пазу довжиною в 1 метр визначають як

$$p' = 2,4 \cdot K_r \cdot j^2 \cdot M \quad (7.51)$$

де j - густина струму в провідниках паза; M - маса міді провідників пазу довжиною

1 м; K_r - коефіцієнт збільшення втрат в обмотці.

У свою чергу маса провідників дорівнює

$$M = \gamma \cdot V = \gamma \cdot 1 \cdot \sum q = \gamma \cdot \frac{A \cdot t_1}{j} \quad (7.52)$$

де γ - питома маса міді; V - об'єм міді пазу на довжині 1 м; $\sum q$ - поперечний переріз міді пазу; A - лінійне навантаження; t_1 - зубцевий крок (поділ); j - густина струму у провідниках обмотки.

З урахуванням теплопередачі через ізоляцію теплопровідністю тепловий опір

$$R_{uz.n} = \frac{b_{uz}}{\lambda_{uz} \cdot S_{uz.n}} \approx \frac{b_{uz}}{2\lambda_{uz} \cdot \Pi_{uz.n}} \cdot \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (7.53)$$

де b_{uz} - одностороння ізоляція пазу (пазова або корпусні); $S_{uz.n} = \Pi_{uz.n} \cdot 1$ - площа пазу довжиною в 1 м, через який відводиться тепло.

Підставивши (7.52) в (7.51), а потім отриманий вираз для p' із (7.53) у (7.50), отримаємо

$$\Delta\theta_{uz} = 2,4 \cdot (A \cdot j) \cdot \gamma \cdot t_1 \cdot K_r \cdot \frac{b_{uz}}{\lambda_{uz} \cdot \Pi_{uz.n}} \quad (7.54)$$

звідки випливає, що величина перепаду температури у пазовій ізоляції залежить від:

$A \cdot j$ - добутку лінійного навантаження на густину струму, цей добуток називають «тепловий фактор»;

b_{uz} - товщини ізоляції пазу;

λ_{uz} - провідності ізоляції пазу;

t_1 - зубцевий крок;

$\Pi_{uz.n}$ - периметра паз, через який відводиться тепло.

Перевірку величини $\Delta\theta_{uz}$ здійснюють після складання специфікації пазу. Якщо розрахункова величина $\Delta\theta_{uz}$ більше рекомендованої, то необхідно внести відповідні зміни. Для великих синхронних машин допустимою величиною для класу нагрівостійкості В рекомендують $\Delta\theta_{uz, \text{дон.}} = 30 \dots 35^{\circ}\text{C}$. Аналогічні рекомендації існують і для інших випадків.

Особливу увагу слід звернути на вираз $A \cdot j$, званого “тепловим фактором”, оскільки він визначає і впливає не тільки на $\Delta\theta_{uz}$. У першу чергу тепловим фактор використовують для попереднього визначення густини струму в обмотці

$$j = \frac{(A \cdot j)}{A} \quad (7.55)$$

Враховуючи важливу роль теплового фактору для зменшення кількості варіантів розрахунку, його значення спочатку рекомендують. Рекомендації подають у вигляді графічних залежностей $(A \cdot j) = f(D_a)$ для асинхронних машин, $(A \cdot j) = f(\tau)$ для синхронних машин і $(A \cdot j) = f(D)$ для машин постійного струму [1, 2]. Для прикладу на рис. 7.30 наведено середні значення теплового фактору для асинхронних

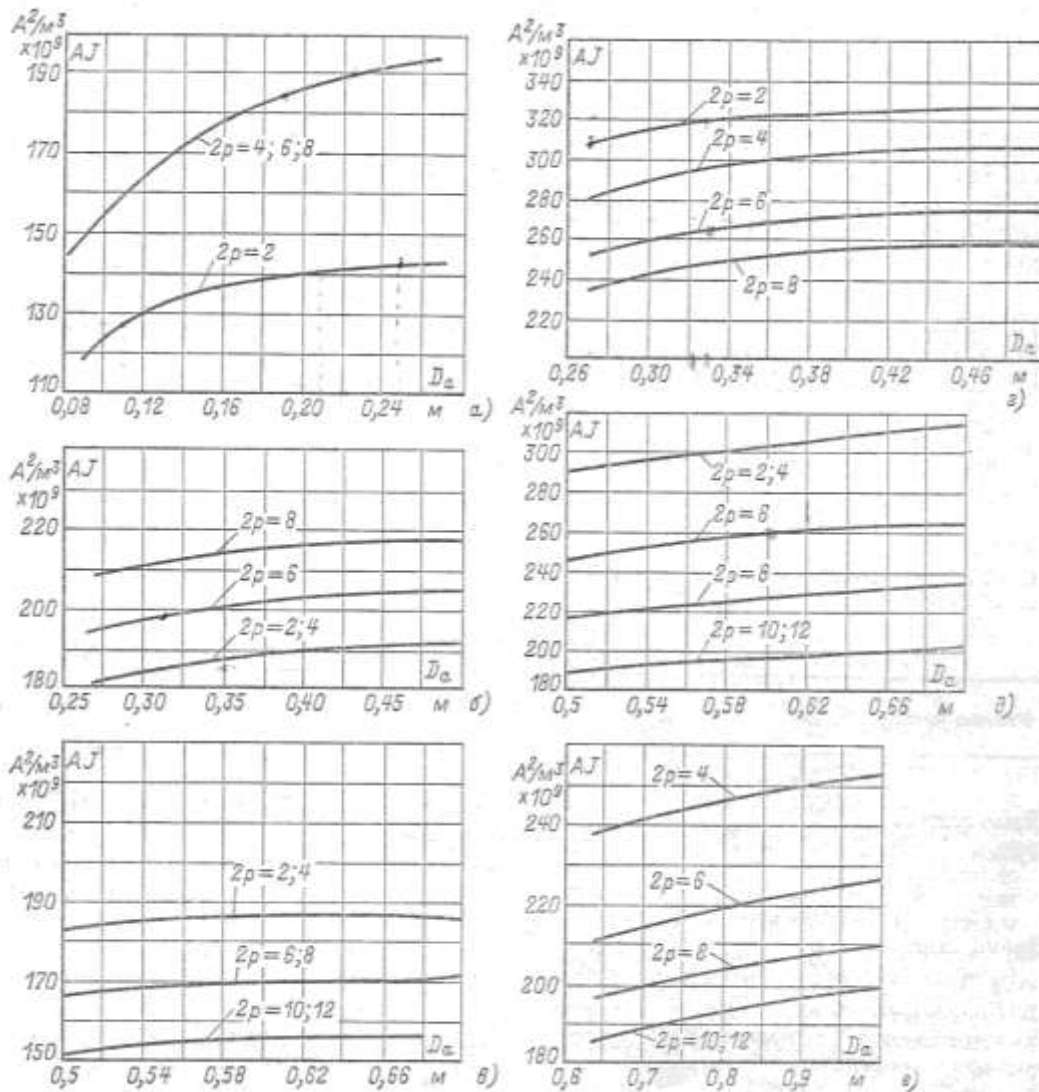


Рис. 7.30. - Значення теплового фактору

7.5. Перевищення температури зовнішньої поверхні

Попередньою оцінкою теплового стану зовнішньої поверхні статора у машинах змінного струму і зовнішньої поверхні якоря машин постійного струму слугують ряд спрощених виразів. Ці вирази засновані на припущенні, що усі втрати виділяються у межах активної довжини сталі статора (ротора) та відводяться з циліндричної поверхні статора (ротора).

Послідовність перевищення температур над охолоджуючим повітрям в даному випадку зводиться до розрахунку теплового потоку на поверхні $q_{нов}$, визначенню коефіцієнта теплопередачі з поверхні $\alpha_{нов}$ і знаходження перевищення температури:

$$\Delta\Theta_{нов} = q_{нов} / \alpha_{нов} \quad (7.56)$$

Як приклад наведено визначення перевищення температури поверхонь над охолоджуючим повітрям асинхронної машини.

Для асинхронних машин з радіальною вентиляцією за охолоджену поверхню

умовно приймають поверхню розточки, тобто по внутрішньому діаметру статора D . У цьому випадку вважають тепловий потік

$$q_{нов} = \rho_{\theta} \cdot A \cdot j \cdot k_r + \frac{p_{c1} + 0,5 \cdot p_{доб}}{\pi \cdot D \cdot L_1} \quad (7.57)$$

де $A \cdot j$ - тепловий фактор; k_r - коефіцієнт враховує збільшення втрат; ρ_{θ} - питомий електричний опір при температурі Θ ; p_{c1} - втрати у сталі статору; $p_{доб}$ - додаткові втрати при навантаженні; D - діаметр розточки статору; L_1 - активна довжина сталі.

Коефіцієнт теплопередачі внутрішньої поверхні статора розраховують за виразом:

$$\alpha_g = \alpha_0 \cdot (1 + 0,1 \cdot g) \quad (7.58)$$

де $\alpha_0 = 66 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ - для радіальної системи вентиляції; g - окружна швидкість ротора.

Використовуючи вираз (7.56), визначають перевищення температури внутрішньої поверхні статору при радіальній вентиляції.

З аксіальною системою вентиляції асинхронних машин умовно приймають за охолоджуючу поверхню зовнішню поверхню по зовнішньому діаметру D_a . Для цього випадку розраховують тепловий потік за формулою:

$$q_{нов} = \frac{\rho_{\theta} \cdot A \cdot j \cdot k_r \cdot D}{D_a} + \frac{p_{c1} + 0,5 \cdot p_{доб}}{\pi \cdot D_a \cdot L_1} \quad (7.59)$$

Коефіцієнт теплопередачі з зовнішньої поверхні статору визначають за (7.58) приймаючи $\alpha_0 = 33$.

Перевищення температури зовнішньої поверхні статору над температурою охолоджуючої середовища знаходять по (7.56).

Аналітичні спрощені формули застосовують і для зовнішньої поверхні якоря машин постійного струму і синхронних машин.

7.6. Перевищення температури лобових частин

При оцінці перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над охолоджуючим повітрям припускають, що відводяться втрати з поверхні, які виділяються тільки в цій частині. Послідовність розрахунку така, як і в попередньому параграфі.

Для асинхронних машин з жорсткою (напівжорсткою) або стрижневою обмотками лобові частини обмотки статора утворюють отвори (як у плетеному кошику). Через отвори продувається повітря, яке охолоджує усі секції обмотки. При цьому вважають, що охолодження здійснюється майже по всьому периметру поперечного перерізу кожної якірної секції.

Тоді питомий тепловий потік на одиницю поверхні лобових частин дорівнює:

$$q_{лоб} = \frac{\rho_{\theta} \cdot A \cdot j \cdot t_1}{\Pi_1} \text{ Вт}/\text{м}^2 \quad (7.60)$$

де ρ_θ - питомий електричний опір міді при температурі; $A \cdot j$ - тепловий фактор; t_1 - зубцевий крок статора; l_1 - периметр поперечного перерізу пазу.

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора над охолоджуючим повітрям

$$\Delta\Theta_{\text{лоб}} = \frac{q_{\text{лоб}}}{13,3 \cdot (1 + 0,07 \cdot \vartheta)} \quad (7.61)$$

де ϑ - окружна швидкість ротору при радіальній вентиляції або вентилятора при аксіальному охолодженні.

Аналогічно розраховують перевищення температур зовнішніх поверхонь лобових частин обмотки над охолоджуючим середовищем якоря машин постійного струму. Коефіцієнт теплопередачі в цьому випадку визначають формулою:

$$\alpha_{\text{лоб}} = \alpha \cdot (1 + 0,07 \cdot \vartheta) \quad (7.62)$$

де величина α приймається залежно від розмірів полюсного поділу.

Подібний підхід і формули використовують і в машинах змінного струму з фазним ротором.

7.7. Перевищення температури обмоток

За спрощеними формулами знаходять усереднені перевищення температури обмоток статора (якоря) над охолоджуючим повітрям. При цьому використовують раніше знайдені перевищення температур в ізоляції пазу $\Delta\Theta_{\text{из}}$, поверхонь $\Delta\Theta_{\text{нов}}$ і поверхонь лобових частин $\Delta\Theta_{\text{лоб}}$. Для машин змінного струму визначення середньої величини перевищення температури обмотки статора над охолоджуючої середовищем знаходять за формулою:

$$\Delta\Theta_{\text{об.с}} = \frac{(\Delta\Theta_{\text{из}} + \Delta\Theta_{\text{нов.с}}) \cdot L_1 + (\Delta\Theta_{\text{из}} + \Delta\Theta_{\text{лоб}}) \cdot l_2}{L_1 + l_2} \quad (7.63)$$

де L_1 - повна довжина пакету статора; l_2 - довжина лобової частини обмотки.

Аналогічні залежності застосовують для визначення середніх перевищень температур обмоток якоря машин постійного струму і обмоток ротору асинхронних машин з фазним ротором.

Перегрів обмоток збудження машин вище припустимого веде до прискореного старіння ізоляції та порушення її термічної міцності.

У машинах постійного струму для обмоток збудження головних полюсів і багатополосових обмоток додаткових полюсів середнє перевищення температур обмоток над охолоджуючим повітрям визначають формулою.

$$\Delta\Theta_{\text{с}} = 1,25 \cdot P_{\text{с.с}} / (S_{\text{с}} \cdot \alpha_{\text{с}}) \quad (7.64)$$

де $P_{\text{с.с}}$ - електричні втрати в обмотці збудження; $S_{\text{с}}$ - середньоарифметична площа поверхні, що омивається повітрям, і поверхні випромінювання, які показані пунктиром на рис. 7.31; $\alpha_{\text{с}} = 5 \cdot (1 + 0,7 \sqrt{\vartheta_a})$ - коефіцієнт теплопередачі з поверхні; ϑ_a - окружна швидкість ротору

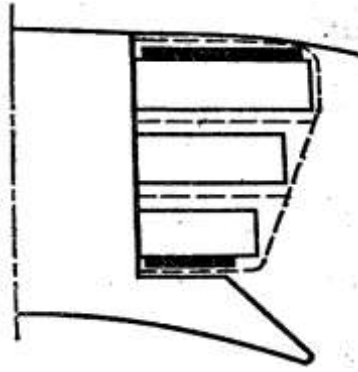


Рис. 7.31. - Теплорозсіюча поверхня котушки збудження

Коефіцієнт 1,25 у (7.64) враховує перепад всередині (товщі) котушок збудження і прийнятий на підставі дослідів для машин нормального виконання.

7.8. Місцеві перегрівів

Теплові схеми заміщення дозволяють визначити усереднені перевищення температур окремих частин машини. Реально нагрівання одних і тих же частин машини нерівномірне.

Для усунення можливості неприпустимих місцевих перегрівів (особливо обмоток) міждержавний стандарт ГОСТ-183-74Е знижує величини допустимих усереднених перевищень температур. Наприклад, для класу "В" (максимальна допустима температура при рівномірній температурі тіла $\Theta_{\max} = 130^{\circ}\text{C}$) становить:

$$\Delta\Theta_{\text{доп}} = \Theta_{\max} - \Theta_{\text{окр.ср.}} - \Delta\Theta_3 = 130 - 40 - 10 = 80^{\circ}\text{C} \quad (7.65)$$

де $\Theta_{\text{окр.ср.}} = 40^{\circ}\text{C}$ - максимальна температура навколишнього середовища відповідно до стандарту ГОСТ-183-74Е; $\Delta\Theta_3 = 10^{\circ}\text{C}$ - запас по нагріванню з урахуванням температури можливих перегрівів.

Для класу "F" нагрівостійкості стандарт встановлює запас з урахуванням місцевих перегрівів - $\Delta\Theta_3 = 15^{\circ}\text{C}$.

Прикладом нерівномірного нагрівання може служити поперечний переріз пазу обмотки якоря (статора), наведеного на рис. 7.32.

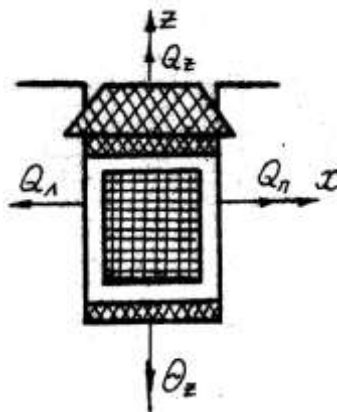


Рис. 7.32. - Поперечний переріз пазу

Вважаючи, що основна частина втрат відводиться у бік вертикальних сторін пазу, тобто по осі X і, нехтуючи відведенням тепла по осі Y, можна записати рів-

няння:

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 (\Delta\Theta_x)}{\partial x^2} - p = 0 \quad (7.66)$$

де λ_x - усереднений коефіцієнт теплопровідності паза по осі X, в основному визначається ізоляцією пазу; p - втрати в пазу на одиницю його довжини.

Інтегрування рівняння (7.66) дає розв'язання у вигляді:

$$\Delta\Theta_x = -\frac{p}{2 \cdot \lambda_x} \cdot x^2 + C_1 x + C_2 \quad (7.67)$$

де C_1 і C_2 - постійні інтегрування; $C_2 = \Delta\Theta_{\max}$ - постійна часу при $x = 0$;

$C_1 = 2(\frac{pb^2}{8\lambda} - \Delta\Theta_{\max} - \Delta\Theta_{\min})/b$ - постійна часу при $x = b/2$.

Очевидно, що найбільш нагрітою точкою паза є його середина, рівновіддалена від стінок пазу на $b/2$, де b - ширина паза з обмоткою.

Графічне рішення рівняння (7.66) наведено на рис. 7.33, що підтверджує нерівномірність нагрівання паза по осі X, тобто точка місцевого розташована по центру пазу.

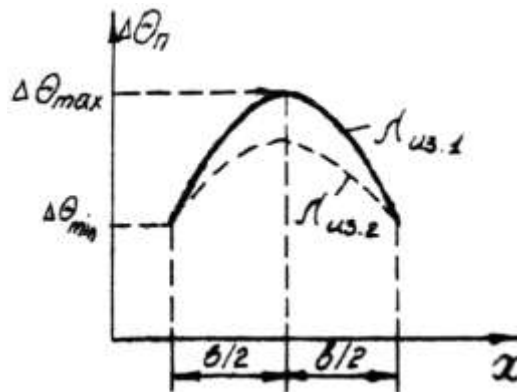


Рис. 7.33.

Слід зазначити, що величина $\Delta\Theta_{\max}$ залежить від чисельного значення усередненого коефіцієнту теплопровідності ізоляції $\lambda_{из}$, зменшення якого ($\lambda_{из2} < \lambda_{из1}$) призводить до зниження $\Delta\Theta_{\max}$, тобто місцевого перегріву.

Нерівномірний розподіл нагрівання машини в цілому (або температурне поле) залежить від величин електромагнітних навантажень, систем охолодження та вентиляції, конструкції і навіть технології виробництва.

7.9. Спрощений розрахунок несталою режиму нагрівання

У ряді випадків необхідно визначити нагрівання електричної машини у несталому режимі, наприклад, при пуску.

Спрощений підхід полягає у поданні всієї машини умовно одним однорідним тілом. У цьому випадку процес нагрівання розглядається, як нагрівання однорідного тіла так, як показано вище.

Для нагрівання в несталому режимі можна використовувати і теплову схему

заміщення.

Наприклад, для однорідного тіла схема має вид на рис. 7.34.

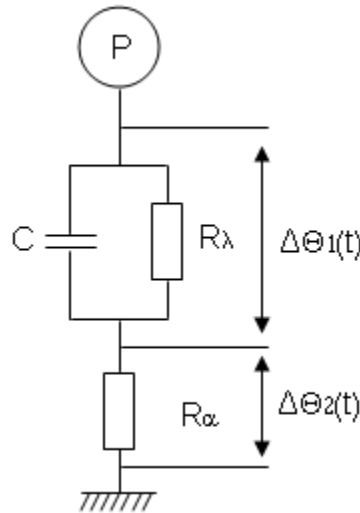


Рис. 7.34. – Теплова схема для однорідного тіла

У цьому випадку процес описується рівняннями:

$$\begin{cases} p = C \frac{d(\Delta\Theta)}{dt} + \frac{\Delta\Theta_1(t)}{R_\lambda} \\ p = \alpha \cdot S \cdot \Delta\Theta_2(t) = \frac{\Delta\Theta_2(t)}{R_\alpha} \end{cases} \quad (7.68)$$

де p - втрати, виділені в тілі; C - теплоємність тіла; R_λ і R_α - теплові опори при теплопередачі відповідно теплопровідністю і конвекцією (плюс випромінювання); $\Delta\Theta_1(t)$ і $\Delta\Theta_2(t)$ - перепади температур на зазначених теплових опорах.

З рис. 7.34 видно, що в перехідному режимі ділянка з теплопередачею теплопровідністю шунтується теплоємністю тіла C . Це за аналогією з електричним колом відповідає електричній ємності.

На практиці використовують рівняння типу (7.68) при розгляді машини в цілому не більше трьома тілами, тому що при збільшенні числа рівнянь їх розв'язок досить трудомісткий.

Нагадаємо, що існують програми розрахунку несталих процесів за допомогою комп'ютерів, де використовуються рівняння Пуассона, Лапласа і граничні умови. Такі програми дозволяють розрахувати теплове поле як двовірне, так і тривірне (тобто по всьому об'єму машини).

РОЗДІЛ № 8. МЕХАНІЧНІ РОЗРАХУНКИ

8.1. Загальні відомості

Метою механічних розрахунків є забезпечення механічної міцності деталей і вузлів машини, що піддаються механічному навантаженню, при мінімальних припустимих запасів по міцності, тобто з мінімально можливою металоємністю, а значить і масою.

Слід зазначити, що між вимогами забезпечення міцності і малою металоємністю (масою) виробу існує діалектичне протиріччя. Це змушує приймати розумні запаси по міцності.

Механічну міцність визначають за допомогою припустимих максимальних механічних напружень (у МПа), визначених експериментальним шляхом для різних видів матеріалів і механічних навантажень. Максимальне механічне напруження називають межею міцності, вище якої з матеріалом відбуваються необоротні зміни або руйнування, що призводить до порушення працездатності деталі або виробу у цілому.

Межі міцності розрізняють залежно від характеру механічного навантаження і властивостей матеріалу:

- текучості;
- міцності;
- втоми (циклічності).

В свою чергу існують межі текучості при:

- розтягу σ_s ;
- згинанні σ'_s ;
- крученні τ'_s .

Під межею міцності розуміють тимчасовий опір розриву σ_B .

Межу міцності при повторюваних (циклічних) навантаженнях розрізняють при:

- розтягу;
- згинанні;
- крученні.

Для кращого запам'ятовування вищевикладених відомостей на рис. 8.1 наведено опорний конспект.



Рис. 8.1. – Опорний конспект

У процесі роботи електричної машини має місце сукупність декількох видів механічних впливів, наприклад, на вал машини.

У загальному випадку механічні зусилля мають місце в електричних машинах при:

- виготовленні;
- експлуатації.

До зусиль, що виникають в процесі виготовлення, відносяться зусилля при зборці і кріпленні окремих частин машини, а саме: зусилля пресування магнітопроводу, кріплення полюсів, фундаментних болтів, запресування магнітопроводу та втулок і т.п.

Зусилля, що виникають при роботі машини, можна розділити на зусилля:

- при нормальній роботі в усталеному режимі;
- при пусках і аномальних режимах роботи.

При нормальних усталених режимах виникають відцентрові зусилля на елементи конструкції ротора, а також зусилля, викликані умовами перетворення енергії (моменти діють як на статор, так і на ротор).

До аномальних режимів слід віднести раптові к.з., при яких виникають додаткові електродинамічні зусилля, що діють на лобові частини обмоток статора і ротора.

З урахуванням перерахованих видів зусиль впливає, що механічному розрахунку з метою перевірки міцності піддається значна частина деталей і вузлів електричних машин.

8.2. Короткий огляд конструкцій і характеру механічних впливів

Видам конструкцій властиве різноманіття. Нижче подані більш поширені, знайомство з якими дозволить розглянути властивості частин і вузлів конструкцій з точки зору характерних механічних зусиль, що діють на них.

8.2.1. Конструкція статорів машин змінного струму

У загальному випадку конструкція статора складається з магнітопроводу, обмотки, корпусу (станини) і підшипникових щитів.

Магнітопровід шихтується з електротехнічної сталі 2312 або 2013 товщиною 0,35-0,5 мм. Розрізняють конструкції магнітопроводів, які мають зовнішній діаметр D_a менше одного метра і більше одного метра.

8.2.1.1. Статори з зовнішнім діаметром магнітопроводу менше одного метра

Магнітопроводи з $D_a \leq 1\text{ м}$ шихтуються з суцільних листів. На рис. 8.2 подано креслення такого листа, де літерою А вказаний шихтовочний знак, а літерою В - заглиблення для стягуючих скоб.

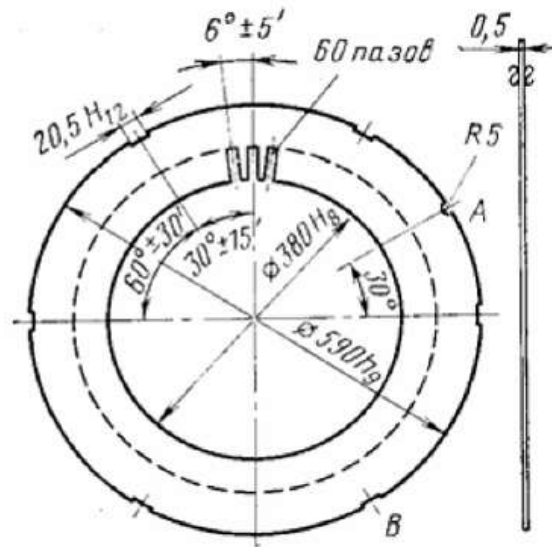


Рис. 8.2. – Вигляд статора з $D_a \leq 1м$

Набраний (зазвичай по масі) пакет магнітопроводу (без радіальних каналів) спресовують.

В асинхронних машинах невеликої потужності з висотою осі обертання $h < 63мм$ спресований магнітопровід заливають у формі алюмінієм або алюмінієвим сплавом, рис. 8.3, де цифрою 1 показаний пакет магнітопроводу, цифрою 2 - оболонка або станина.

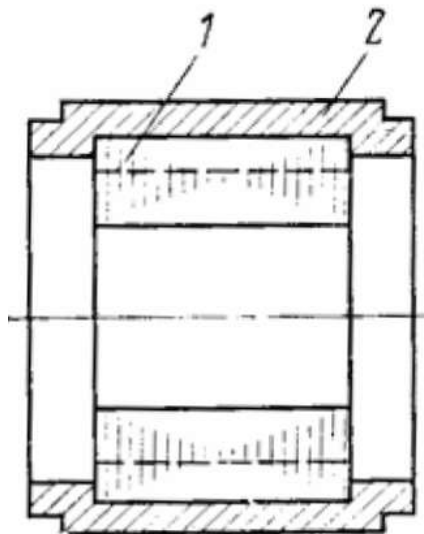


Рис. 8.3. – АМ з $h < 63мм$

Залитий оболонкою 2 магнітопровід 1 залишається у запресованому стані, бо торці оболонки скріплюють магнітопровід. При цьому торці зазнають впливу зусиль від запресовування, їх перевіряють на згин.

У машинах з висотою осі обертання $63 \leq h \leq 355$ пакет магнітопроводу виконують суцільним (без радіальних каналів) і кріплять за допомогою скоб.

У деяких конструкцій стяжні скоби (рис. 8.4), які зазнають зусиль розтягування, проварюють уздовж пакета магнітопроводу, що усуває можливість ослаблення пресування.

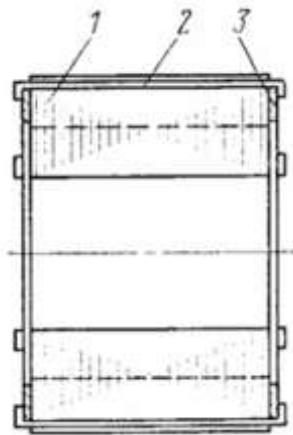


Рис. 8.4. – АМ з $63 \leq h \leq 355$ мм

Під краями скоб 2 розташовують натискну шайбу 3 для усунення розпушування пакета. У машинах малої потужності функцію натискної шайби виконують два крайніх листа, скріплені між собою точковим зварюванням, або потовщені до 1-2 мм листи.

Натискні шайби розраховують на згин від зусиль запресовування.

При відносно великих довжинах магнітопроводу його виконують у вигляді пакетів, між якими утворюють канали за допомогою розпірок.

Розпірки точковим зварюванням приварюють до одного з листів каналу (рис. 8.5).

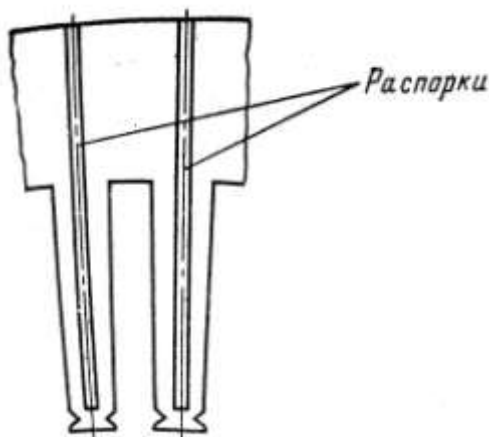


Рис. 8.5. - Пакети статору з допомогою розпірок

Форми розпірок показані на рис. 8.6.



Рис. 8.6. - Форми розпірок

Найчастіше застосовують розпірки з двотавровим перерізом.

Магнітопроводи статорів поміщають у станину, яку виготовляють в залежності від ступеня захисту.

Для IP44 застосовують станини литі чавунні циліндричної форми. У їх внутрішню гладку поверхню запресовують магнітопровід. Вибором типу посадки впресування забезпечують достатню силу тертя для запобігання обертання магнітопро-

воду. Для двигунів $160 \leq h \leq 355$ зв'язок між станиною та магнітопроводом додатково фіксують за допомогою стопорного гвинта.

При зовнішніх діаметрах від 520 до 990 мм магнітопровід впресовується в чавунну станину, на внутрішній поверхні якої виконуються ребра, розточені по другому класу. Приклад такого синхронного двигуна наведено на рис. 8.7.

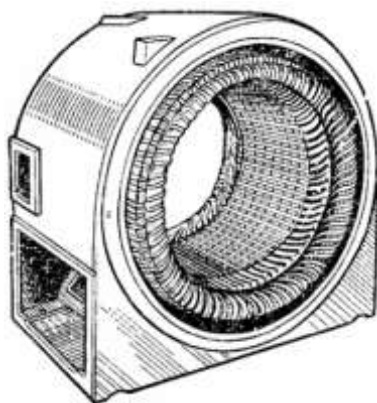


Рис. 8.7. - Осердя, впресоване в чавунну станину

З одного боку (рис. 8.8) у ньому ребра 2 виконують з виступами. До них приварюють натискну шайбу 1, потім палець 3. Далі шихтують магнітопровід, який в спресованому стані залишається за допомогою натискної шайби і пальців за рахунок запірної шпонки 4.

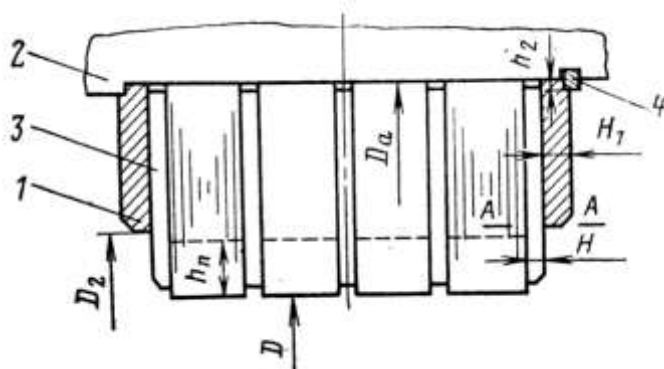


Рис. 8.8. - Осердя з виступами

На натискні шайбу і пальці, а також запірну шпонку діють зусилля від запресовування (зазвичай зусилля запресовування $q_c = (7 \dots 10) \cdot 10^5 \text{ Па}$. Натискні шайби і пальці перевіряють на згин, а запірну шпонку на зминання.

Переміщення магнітопроводу відносно ребер усувають застосуванням заглиблень у листах магнітопроводу. У цьому випадку міцність розташування перевіряють припустимими механічними напруженнями ребер і листів магнітопроводу на зминання.

До станини кріпляться підшипникові щити за допомогою шпильок і болтів. У підшипникові щити запресовують підшипники кочення. У машинах з $h < 160 \text{ мм}$ застосовують з обох боків кулькові підшипники, а при $h \geq 160 \text{ мм}$ з одного боку ставлять роликовий підшипник, здатний витримати великі радіальні зусилля.

Станина за допомогою фундаментних болтів кріпиться до основи місця встановлення, при цьому необхідна перевірка на міцність фундаментних болтів.

8.2.1.2. Статори з зовнішнім діаметром якоря більше одного метра

Магнітопровід статора електричних машин з зовнішнім діаметром більше 1 метра збирають з сегментів (рис. 8.9).

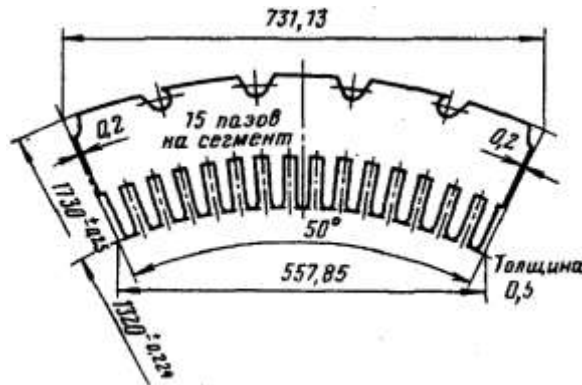


Рис. 8.9. - Сегмент статору

Шихтовка здійснюється пошарово або по гвинту. Розмір хорди сегмента вибирають з урахуванням економного розкрою ширини листа або рулону електротехнічної сталі (рис. 8.10), стики листів повинні перекриватися.

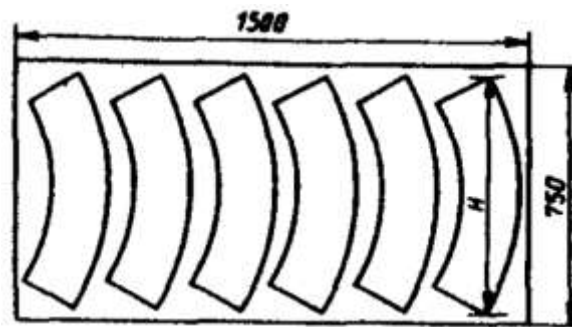
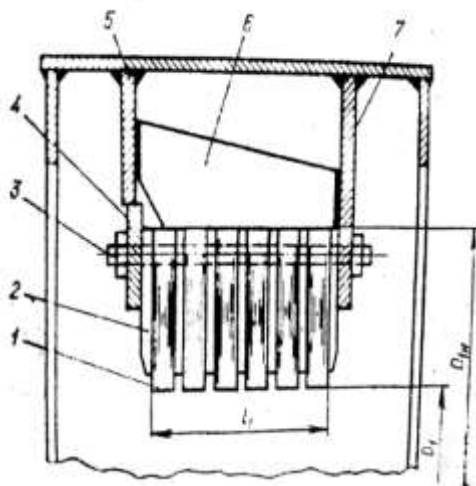


Рис. 8.10. - Розкрій листа статору

Радіальні канали виконують у магнітопроводі за допомогою розпірок (рис. 8.5 і рис. 8.6).

Для кріплення магнітопроводу частіше застосовують шпильки, що стягують натискні шайби і пальці (рис. 8.11).



- 1 – пакет магнітопроводу;
- 2 – натискний палець, що запобігає від розпушування листів;
- 3 – стягуюча шпилька;
- 4 – натискна шайба;
- 5 – поперечне ребро станини;
- 6 – повздовжнє ребро станини;
- 7 – поперечна глуха стінка станини.

Рис. 8.11. - Кріплення магнітопроводу

Слід зазначити, що поперечне ребро 5 дозволяє переміщатися натискній шайбі

4 для компенсації температурних змін розмірів магнітопроводу.

Машини великих потужностей, які мають $D_a > 1\text{м}$, виконують зі зварними станинами (рис. 8.12).

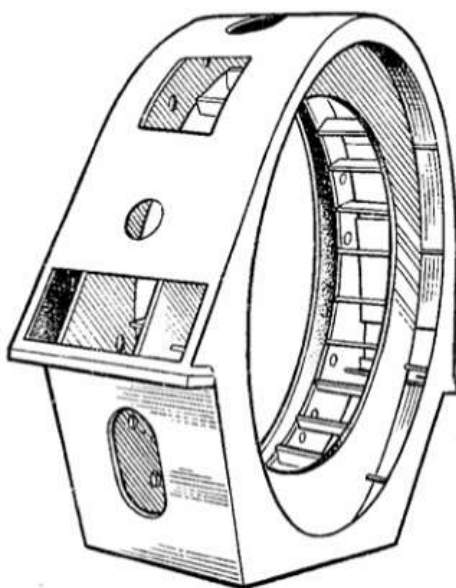


Рис. 8.12. - Зварна станина

Такі станини мають меншу масу і енергоємність при виготовленні ніж литі, а також більш технологічні при виготовленні.

Розрахунками на міцність перевіряють в цьому випадку:

- натискні шайби на згин;
- натискні пальці на згин;
- стяжні шпильки на розрив;
- ребра станини на згин і розрив.

Магнітопровід з обмоткою сучасних потужних гідрогенераторів виконують у вигляді рознімних секцій (рис. 8.13).

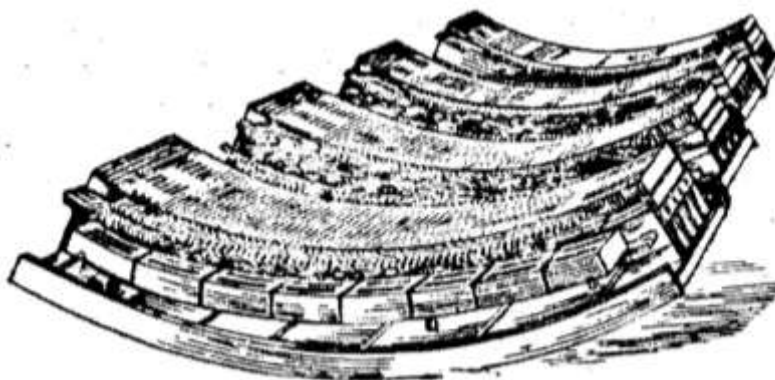


Рис. 8.13. - Осердя у вигляді рознімних секцій

Транспортування до місця збирання здійснюється секціями.

Роз'ємні болти, що скріплюють секції, розраховують на розрив.

8.2.2. Конструкція статорів машин постійного струму

Статор машин постійного струму складається з наступних основних вузлів:

станини, полюсів, обмоток збудження, підшипникових щитів і щіткового пристрою. Нижче розглядаються основні вузли, які беруть участь в перетворенні енергії та підлягають перевірці на механічну міцність.

8.2.2.1. Станина

Виконуючи роль ділянки магнітного кола машини, станина необхідна для кріплення головних і додаткових полюсів з їх обмотками. Вона являє собою порожнистий тонкостінний циліндр, зазвичай зварюваний з листової сталі Ст3, або литий. Товщину станини вибирають з урахуванням максимально можливого обертового моменту машини. До станини приварюють лапи, які разом з фундаментними болтами запобігають повороту станини. За допомогою болтів, що проходять через отвори в тілі станини, кріплять основні і додаткові полюси. Болти зазнають зусиль розтягування від зусиль притискання полюсів до станини. Кількість кріпильних болтів повинна бути не менше двох на кожен полюс.

У машинах постійного струму більших потужностей, що працюють при ударному навантаженні, статор складається з товстостінної оболонки, на внутрішній поверхні якої виконують шихтоване ярмо (спинку).

8.2.2.2. Полюси

У загальному випадку до станини (ярма) кріплять головні і додаткові полюси. На головних полюсах розташовують обмотку паралельного і послідовного збудження. На рис. 8.14 показаний головний полюс з паралельною обмоткою збудження.

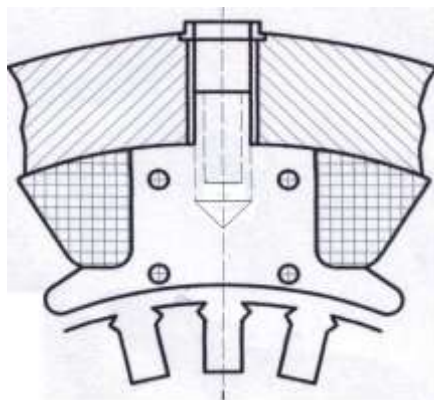


Рис.

8.14. - Головний полюс

Для поліпшення комутації та форми поля під полюсом при навантаженні у полюсних наконечниках виконують пази, куди укладають компенсаційну обмотку (рис. 8.15).

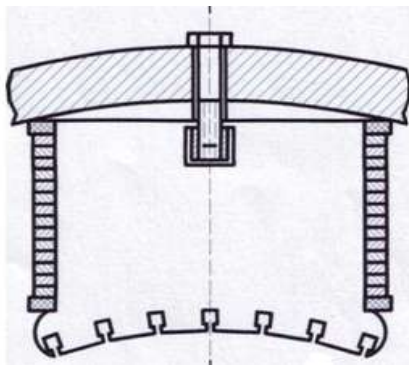


Рис. 8.15. - Пази для компенсаційної обмотки

Головні полюси шихтують з листів електротехнічної сталі товщиною 1 мм. У зібраному стані їх обпресовують під тиском (20...25) МПа і скріплюють заклепками (рис. 8.16).

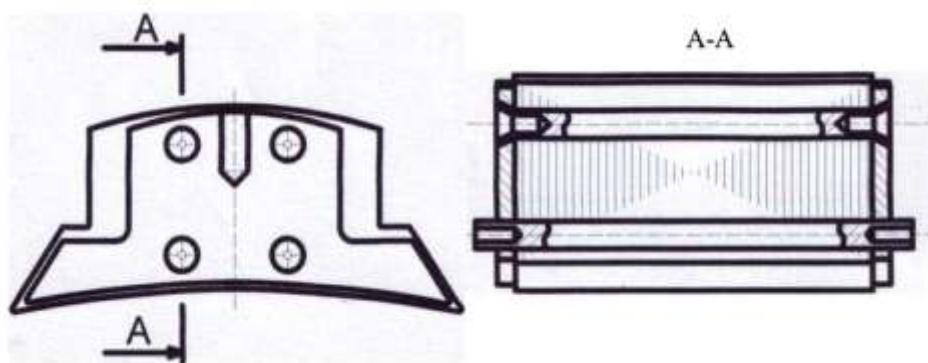


Рис. 8.16. - Скріплення полюсу заклепками

Крайні листи пакету полюса виконують з листової сталі товщиною (4...10) мм. Ці листи за розмірами дещо менші, ніж листи полюса. Заклепки розраховують на розтяг.

Кріплять головні полюси до станини за допомогою болтів, які у машинах невеликих потужностей безпосередньо вкручують у полюс (рис. 8.14), при великих потужностях - в стрижень, розташований у полюсі (рис. 8.17).

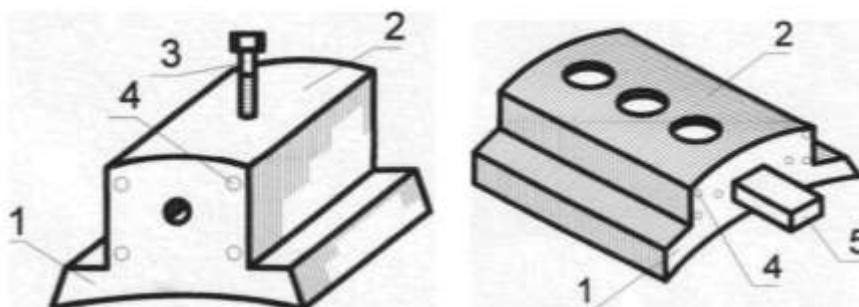


Рис. 8.17. - Кріплення полюсу болтам

Кріплення полюса розраховують на зсув, а заклепки і кріпильні болти (не менше 2-х) на розтяг.

Додаткові полюси виготовляють литими (рис. 8.18а,б) або шихтованими (рис. 8.18в,г) з листової сталі товщиною 1 мм. Полички наконечників полюсів для підтримки обмотки виконують з немагнітного матеріалу і кріплять до тіла полюса заклепками (рис. 8.18б,г).

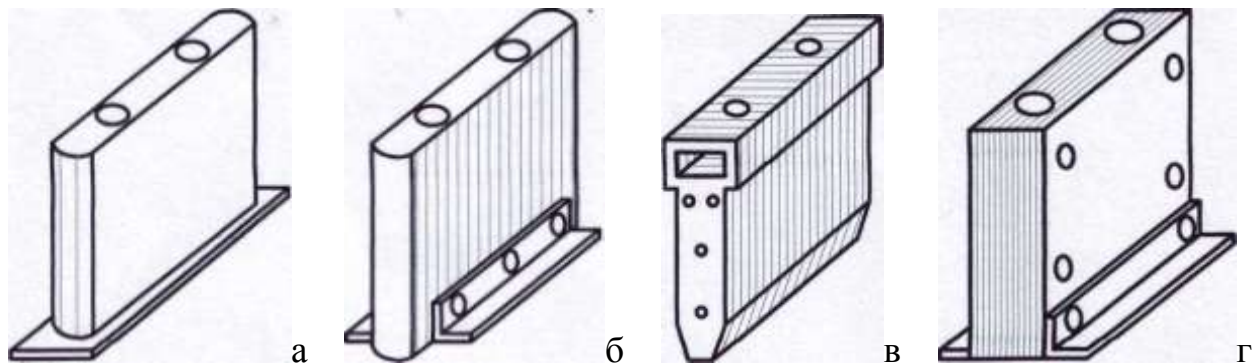


Рис. 8.18. - Литі та шихтовані додаткові полюси

Крім перевірки на розтяг заклепок і кріпильних болтів, а також на зсув, додаткові полюси перевіряють на перекидання від сил взаємодії між головними і додатковими полюсами.

8.3. Розрахунок механічних напружень, які виникають при виготовленні машин

8.3.1. Розрахунок натискних шайб, пальців і шпонок

На натискні пальці і шайбу діє згинальний момент, створений рівномірним тиском спресованого магнітопроводу. Повне зусилля запресовування дорівнює, Н:

$$Q_3 = q_c (T_{c1} D_a^2 - S_n) \quad (8.1)$$

де q_c - питомий тиск, який дорівнює $(0,7...1) \cdot 10^6 \text{ Па}$; $T_{c1} = 0,785(1 - \alpha^2)$ - коефіцієнт, який визначається залежністю $\alpha = D/D_a$ (рис. 8.19); S_n - площа перерізу усіх пазів статора; D_a - зовнішній діаметр магнітопроводу статора.

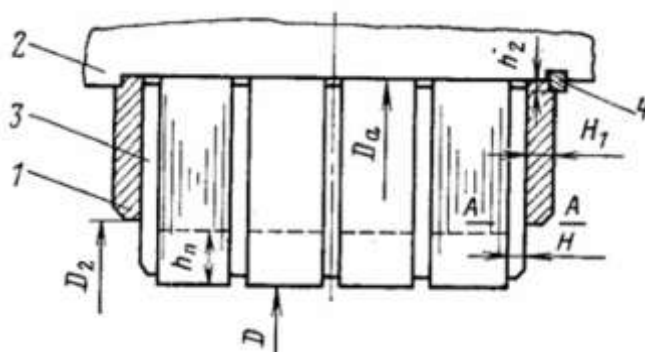


Рис. 8.19. - Магнітопровід статора, запресований натискними шайбами:
1 - натискна шайба; 2 - ребро станини; 3 - натискні пальці; 4 - запірна шпонка.

Діаметр рівнодіючого зусилля запресовування, м,

$$D_p = \frac{T_2 D_a^3 - S_n (D + h_n)}{T_{c1} D_a^2 - S_n} \quad (8.2)$$

де $T_2 = 0,524(1 - \alpha^2)$ - коефіцієнт; h_n - висота пазу.

Момент, що згинає натискну шайбу, $H \cdot m$

$$M_1 = \frac{Q_3(D_a - D_p)}{2} \quad (8.3)$$

Напруження згину, Па,

$$\sigma_1 = \frac{6M_1}{\pi \left(\frac{D_a + D_2}{2} \right) H_1^2} \quad (8.4)$$

де D_a, D_2, H_1 – у метрах (рис. 8.19).

Припустимо напруження для сталі Ст3 $\sigma_{don} = 600 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Згинальний момент, що діє на натискні пальці крайніх листів сердечника у перетині А-А (рис. 8.19), $H \cdot m$,

$$M_2 = \frac{q_c}{Z_1} \left[\left(\frac{D_2}{10} \right)^3 T_3 - \frac{S_n}{2} (D_2 - D - h_n) \right] \quad (8.5)$$

де $T_3 = 131(1 - \alpha^2) \cdot (1 + 2\alpha_1)$; $\alpha_1 = D/D_2$; Z_1 - кількість пазів.

Напруження згину пальців, Па, при двотавровому перерізі пальця (рис. 8.20)

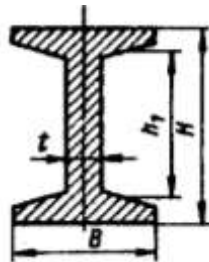


Рис. 8.20. - Розміри двотаврового перерізу натискного пальця

$$\sigma_2 = \frac{6HM_2}{BH^3 - b_1h_1^3} \quad (8.6)$$

де $B, H, h_1, b_1 = B - t$ - розміри у метрах (рис. 8.20).

При прямокутному перерізі пальця

$$\sigma'_2 = \frac{6M_2}{BH^2} \quad (8.7)$$

Припустимо напруження для сталі Ст3 дорівнює $1600 \cdot 10^5 \text{ Па}$; для комбінованих таврів зі сталі Ст3 - $1900 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Напруження зминання дугової шпонки, Па,

$$\sigma_{cm} = \frac{Q_2}{mb_2h_2} \quad (8.8)$$

де m - число шпонок; b_2, h_2 - розміри контактної поверхні однієї шпонки.

Припустимо напруження $\sigma_{см} = 1500 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

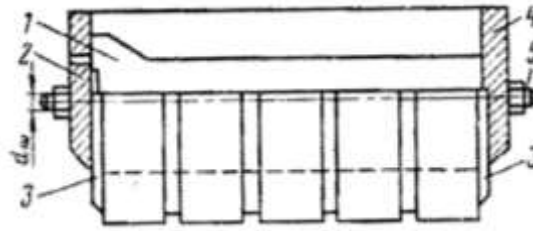


Рис. 8.21. - Магнітопровід статора, стягнутий шпильками:
1 – ребро станини; 2 – натискна шайба; 3 – натискні пальці; 4 – глуха стінка станини; 5 шпильки.

8.3.1.1. Розрахунок діаметру і кількості шпильок

Цей розрахунок проводять по зусиллю запресовування сердечника, що визначають по (8.1).

Кількість шпильок

$$m_{ш} \geq Q_z / \sigma S_0 \quad (8.9)$$

де $S_0 = \pi d_{0ш}^2 / 4$ - площа перерізу шпильки по нарізці; $d_{0ш}$ - внутрішній діаметр різьби шпильки, м.

Припустимо напруження σ для шпильок зі сталі марки Ст3 - $1600 \cdot 10^5 \text{ Па}$, зі сталі марки Ст5 - $2100 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Натискні пальці розраховуються так само, як і в попередньому випадку.

8.4. Розрахунок кріплення головних полюсів машин постійного струму

Кріплення головних полюсів здійснюють до станини при виготовленні машин постійного струму. При цьому виникають зусилля які, зумовлені виготовленням та навантаженням.

Шихтовані полюса скріплюють заклепками (рис. 8.22), які перевіряють на розтягування.

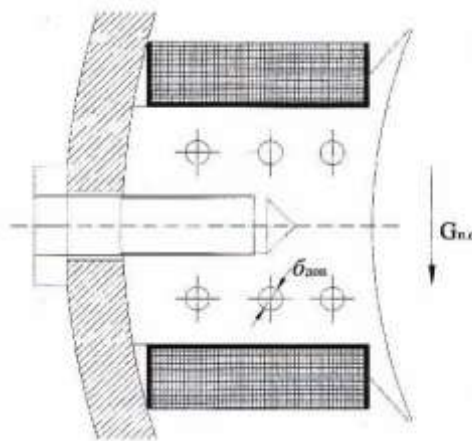


Рис. 8.22. - До розрахунку кріплення полюсу

Розрахункова величина напруги розтягнення повинна задовольняти умові

$$\sigma = \frac{4 \cdot q_{\text{эн}} \cdot S_n}{\pi \cdot d_3^2 \cdot m_3} \quad (8.10)$$

де $q_{\text{эн}} = (2 \dots 2,5) \text{ МПа}$ - питоме пресове зусилля листів полюса; S_n - площа листа полюса; d_3 - діаметр заклепки; m_3 - кількість заклепок (не менше 4-х).

Розрахунок кріплення головного полюса до станини проводять для горизонтального розташування його осі (рис. 8.22).

У цьому випадку співпадають сила тяжіння полюса з обмоткою $G_{n.o}$ та тангенціальна сила Q від обертового моменту. Ці сили прагнуть зсунути полюс, а кріпильні болти так повинні притягувати полюс до станини, щоб сила тертя між поверхнями станини і полюса була більше сумарного зусилля зсуву.

Тангенціальна сила від моменту навантаження

$$Q = \frac{K \cdot M_n}{p \cdot D_3} \quad (8.11)$$

де $K = (2 \dots 3)$ - коефіцієнт перевантаження машини; p - число пар полюсів; $M_n = 9550 \cdot P_n / n_n$ - номінальний момент; P_n - номінальна потужність; n_n - номінальна частота обертання; D_3 - діаметр якоря;

Сила тяжіння полюса з обмоткою

$$G_{n.o} = 9,81 \cdot m_{n.o} \quad (8.12)$$

де $m_{n.o}$ - маса полюса з обмоткою.

Необхідна площа перерізу болтів по внутрішньому діаметру різьби для кріплення полюсів

$$S_{\delta} = \frac{Q + G_{n.o}}{0,2 \cdot \sigma_{np}} \quad (8.13)$$

де 0,2 - коефіцієнт тертя між станиною та полюсом; $\sigma_{np} = 60 \text{ МПа}$ - припустима напруга розтягнення болтів із сталі Ст 3.

Діаметр болта повинен бути по внутрішньому діаметру різьби

$$d_{01} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\delta}}{\pi \cdot m_{\delta}}} \quad (8.14)$$

де m_{δ} - число болтів на полюс ($m_{\delta} \geq 2$).

Подібний розрахунок кріплення проводять для додаткових полюсів [2], де враховують можливість перекидання і зсуву шляхом збільшення сили затягування кріпильних болтів.

8.5. Розрахунок валу

8.5.1. Загальні відомості

Електричні машини загального призначення виконують переважно з горизонтальним розташуванням валу. У цьому випадку вал несе на собі усю масу обертових частин, через нього передається обертовий момент машини. При з'єднанні машини з виконавчим механізмом (для двигуна) або з приводним двигуном (для генератора) через ремінну або зубчасту передачу, а також і через муфту на вал діють додаткові згинальні сили. На вал також діють сили одностороннього магнітного тяжіння, викликані магнітною несиметрією. На вал діють зусилля, що з'являються через наявність небалансу обертових частин, а також зусилля, що виникають при появі крутильних коливань.

Правильно сконструйований вал повинен бути досить міцним, щоб витримати всі діючі на нього навантаження без появи залишкових деформацій. Вал повинен так само мати достатню жорсткість, щоб при роботі машини ротор не торкався статора. Критична частота обертання валу повинна бути відмінною від робочих частот обертання машини. При критичній частоті обертання сила небалансу має частоту, рівну частоті власних поперечних коливань вала (тобто настає явище резонансу). При цьому різко збільшуються прогин валу і вібрація машини, що може привести до руйнування валу.

Вали виготовляють з вуглецевих сталей, переважно зі сталі марки Ст45. Для підвищення механічних властивостей сталей їх піддають термічній обробці.

Розміри валу визначають при розробці конструкції. Вали мають ступеневу форму з великим діаметром у місці розміщення магнітопроводу ротора. Кількість ступенів валу залежить від кількості вузлів машини, що розміщуються на ньому (магнітопровід, колектор, підшипники, вентилятор, контактні кільця). При переході з одного діаметра вала на інший для попередження неприпустимої концентрації напружень у місцях переходів повинні бути передбачені округлення (галтелі) мінімально можливого радіусу. Відношення радіусу галтелі до діаметру валу має бути не менш ніж 0,05. З цієї ж причини не слід застосовувати відношення діаметрів сусідніх ступенів валу більше 1,3. Іноді для фіксації положення пакету магнітопроводу ротора на валу передбачається буртик. Діаметр валу у тій його частині, де розміщується магнітопровід, попередньо можна вибрати за формулою

$$d_c = k_B \sqrt[3]{P_{ном} / n_{ном}} \quad (8.15)$$

де $P_{ном}$, $n_{ном}$ - номінальні значення відповідно потужності, кВт, та частоти обертання; k_B - коефіцієнт, значення якого слід прийняти рівним 24-29 для машин середньої потужності і 18-20 - для великих машин (від 400 кВт і вище).

Остаточні розміри валу встановлюють після його розрахунків на жорсткість і міцність. Вільний кінець валу має циліндричну або конічну форму. Широке застосування мають вали з циліндричним кінцем. На цей кінець насаджують напівмуфту, шків, або шестерню, які закріплюють за допомогою шпонки. На валу є ще ряд шпонок для закріплення різних вузлів, що розміщуються на валу. З метою спрощення обробки валу ширину всіх шпонок бажано брати таку ж, як і у вільного кінця.

Розміри вільного кінця валу (рис. 8.23) повинні бути обрані згідно з вимогами міждержавного стандарту (табл. 8.1).

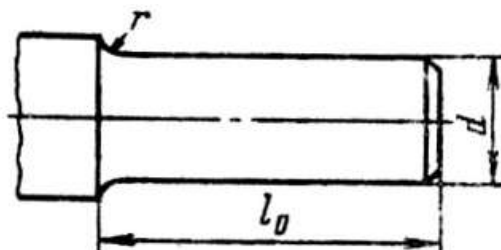


Рис. 8.23. - Вільний кінець валу

Кінці валів передбачаються двох виконань - довгі і короткі.

Таблиця 8.1 – Циліндричні кінці валів

d , мм	l_0 , мм	
	Виконання	
	1	2
7	16	—
9	20	—
11	23	—
14	30	—
16 18 19	40	28
22 24	50	36
28	60	42
32 38	80	58
42 48 55	100	82
60 65 70 75	140	105
80 85 90 95	170	130

Таблиця 8.1 – Циліндричні кінці валів

d , мм	l_0 , мм	
	Виконання	
	1	2
100 110 125	210	165
140	250	200
150	250	210
160 170 180	300	240
190 200 220	350	280
250	410	330
280 320	470	380
360	550	450

Шпонки для вільного кінця вала також вибирають відповідно до вимог стандарту.

При конструюванні валу слід також узгодити розміри шийок валу, на яких розміщують підшипники, з розмірами обраних підшипників.

8.5.2. Розрахунок валу на жорсткість (прогін)

При розрахунку прогину вала приймають, що уся маса активної сталі ротора з обмоткою (та колектором у машинах постійного струму) і ділянок вала під ними зосереджена посередині довжини магнітопроводу. Масу зазначених частин визначають за даними електромагнітного розрахунку. Масою інших частин вала можна знехтувати.

Приймаючи, що ротор асинхронного двигуна чи якір машини постійного струму являють собою суцільний циліндр з середньою питомою густиною 8300 кг/м^3 , його масу можна визначити як

$$m_p = 6500 D_2^2 l_2 \quad (8.16)$$

Маса ротору синхронної машини приблизно дорівнює

$$m_{p.c} \approx 6260 D_2^2 l_j \quad (8.17)$$

а маса колектору

$$m_k = 6100 D_k^2 l_k \quad (8.18)$$

де D_2 - зовнішній діаметр ротору (якоря); l_2 - довжина осердя без радіальних вентиляційних каналів; D_k, l_k - зовнішній діаметр і довжина колектора; l_j - довжина ротора.

У машинах постійного струму, коли колектор насаджується на вал, розрахунок прогину валу проводять, виходячи з приведеної сили тяжіння

$$G_p = G'_p + \varphi G_k = 9,81(m_p + \varphi m_k) \quad (8.19)$$

де m_p - маса якоря з обмоткою і валом; m_k - маса колектору з валом під ним; φ - коефіцієнт, який приймають з табл. 8.2 в залежності від відношень b/l та a_1/l (рис. 8.24).

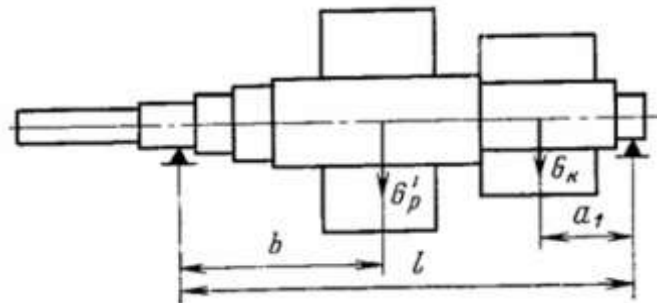


Рис. 8.24. - До визначення коефіцієнту φ

Таблиця 8.2 – Залежність b/l і a_1/l

b/l	a_1/l					
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,3	0,6	0,84	1,02	1,12	1,12	1
0,4	0,55	0,77	0,94	1,03	1	0,86
0,5	0,56	0,78	0,94	1	0,94	0,78
0,6	0,62	0,86	1	1,03	0,94	0,77
0,7	0,75	1	1,12	1,12	1,02	0,82

При кріпленні колектора до корпусу якоря маса колектора враховується як добавка до маси якоря.

При визначенні прогину вала використовують аналітичний метод. Для цього необхідно мати ескіз вала з усіма його розмірами (рис. 8.25).



Рис. 8.25.

Вал розбивають на три ділянки: a, b і c . Прогин вала під дією сили G_p на ділянці, відповідній середині магнітопроводу

$$f_G = \frac{G_p}{3El^2} (S_b a^2 + S_a b^2) \quad (8.20)$$

де $E = 2,06 \cdot 10^{11}, \text{Па}$ - модуль пружності.

$$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}, \quad S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} \quad (8.21)$$

J_i - екваторіальний момент інерції валу, для суцільного валу діаметром d маємо $J = \pi d^4 / 64$, для полого валу $J = \pi(d^4 - d_{\text{омб}}^4) / 64$; $G_p = 9,81 m_p$ - сили тяжіння ротору.

В (8.20) усі лінійні розміри повинні бути прийняті у метрах. Розрахунок f_G зручно представити у вигляді таблиці.

Електрична машина з'єднується з виконавчим механізмом або двигуном одним із зазначених способів: через ремінну передачу, зубчасту передачу або через пружну муфту. При роботі машини виникають поперечні сили F_n прикладені до виступаючого кінця валу і відповідно викликані натягом ремня, тиском на зубець шестерні або ж неточністю сполучення валів і деталей муфт. Цю силу F_n , Н, можна визначити як

$$F_n = k_n M_{\text{ном}} / R \quad (8.22)$$

де $M_{\text{ном}}$ - номінальний обертовий момент, Н·м:

- для двигуна

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} \quad (8.23)$$

- для генератора

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}} / (\eta n_{\text{ном}}) \quad (8.24)$$

$P_{\text{ном}}, n_{\text{ном}}$ - номінальні потужність, кВт, та частота обертання, об/хв; k_n - коефіцієнт; при передачі пружною муфтою $k_n = 0,3$, при передачі зубчастими шестернями $k_n = 1,05$, при передачі клиновими ремнями $k_n = 1,8$, при передачі плоскими ремнями $k_n = 3$; R - радіус діляльного кола шестерні або радіус центрів пальців муфти або кола шківів, м.

Сила F_n викликає додатковий прогин вала під серединою магнітопроводу

$$f_n = \frac{F_n c}{3El^2} \left[\left(\frac{3}{2} l S_0 - S_B \right) a + S_a b \right] \quad (8.25)$$

де $S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$ (рис. 8.25 і таблиця 9.3 [2]); c - відстань від точки прикладення

сили F_n до найближчої опори, м.

При з'єднанні валів за допомогою шківів або зубчастої шестерні точка прикладання сили F_n лежить у середині вільного кінця вала (рис. 8.23). При з'єднанні

валів еластичною муфтою сила прикладання лежить посередині пружної частини пальців.

Прогин валу викликають також сили одностороннього тяжіння, які виникають, якщо ротор буде зміщений з центрального положення по відношенню внутрішнього діаметра статора. Спочатку зміщення ротора відбувається внаслідок неточності обробки, а потім за рахунок зношування підшипників і прогину вала під дією сил G_p і F_n .

Попередній прогин ротора, м, приймають рівним

$$e_0 = 0,1\delta + f_G + f_n \quad (8.26)$$

де δ - повітряний проміжок, м.

Внаслідок прогину ротора магнітні потоки полюсів будуть неоднаковими. У полюсів, розташованих з боку менших повітряних зазорів, потоки більші. Відповідно більша і сила поперечного магнітного притягання. Силу одностороннього магнітного протягування, H , викликану зміщенням ротора на e_0 , визначають по формулі

$$T_0 = 2,94D_2l_2 \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 \quad (8.27)$$

де D_2 - діаметр ротору, м; l_2 - довжина ротору без радіальних каналів, м.

Сила T_0 викликає додатковий прогин валу, який пропорційний прогину f_G від сили тяжіння ротору

$$f_T = f_G T_0 / G_p \quad (8.28)$$

Внаслідок збільшення прогину, сили магнітного тяжіння збільшаться, що викличе подальше збільшення прогину. Так буде тривати до тих пір, поки магнітне тяжіння і жорсткість вала не урівноважаться, при цьому усталений прогин під дією сил магнітного тяжіння буде дорівнювати:

$$f_m = f_T / (1 - m) \quad (8.29)$$

де $m = f_T / e_0$.

Результуючий прогин валу визначається для найгіршого випадку, коли інші складові прогинів підсумовуються:

$$f = f_M + f_G + f_n \quad (8.30)$$

Для надійної роботи машини вибір допустимого прогину залежить від способу її з'єднання з виконавчим механізмом або двигуном.

При застосуванні пружної сполучної муфти сумарний прогин у відсотках довжини повітряного зазору повинен становити в асинхронних двигунах не більше 10%, у синхронних машинах - не більше 8% і в машинах постійного струму - не більше 6%. У випадку ремінної передачі прогин повинен бути не більше 10% повітряного зазору. При обмеженні перекосу зубів при зубчастій передачі прогин не повинен перевищувати 10% у асинхронних двигунів, 7% у синхронних машин і 5% у машин постійного струму.

8.5.3. Критична частота обертання

Для визначення критичної частоти обертання, об/хв, використовують наближену формулу, яка одержана при врахуванні одностороннього магнітного тяжіння і припущення, що ротор являє однорідну масу

$$n_k \approx 30 \sqrt{(1-m)/f_G} \quad (8.31)$$

Робоча частота обертання ротора повинна відрізнятися від критичної не менш ніж на 30 % (по абсолютній величині).

8.5.4. Розрахунок валу на міцність

Вал електричних машин передає обертовий момент і, крім того, зазнає впливу згинальних зусиль від сил ваги, магнітного тяжіння і від поперечних сил на вільному кінці. У результаті цього вал зазнає впливу спільної дії напружень згину і кручення.

При спільній дії напружень згину і кручення з теорії найбільших дотичних напружень розрахунок зведено до випадку напружень згину, Па, яке визначають за формулою

$$\sigma_{IP} = \sqrt{\sigma^2 + 4(\alpha\tau)^2} \quad (8.32)$$

де σ - напруження згину, Па; τ - напруження згину, Па; α - відношення допустимого напруження при згинанні до подвоєної допустимої напруги при крученні.

Враховуючи, що

$$\sigma = M_u / (0,1d^3) \quad (8.33)$$

$$\tau = kM_{ном} / (0,2d^3) \quad (8.34)$$

після підстановки одержуємо розрахункову формулу

$$\sigma_{IP} = \frac{1}{W} \sqrt{M_u^2 + (k\alpha M_{ном})^2} \quad (8.35)$$

де W - момент опору при згині, $м^3$, для валу діаметром d

$$W = 0,1d^3 \quad (8.36)$$

M_u - згинальний момент в розрахунковому перерізі, Н·м; $M_{ном}$ - номінальний обертовий момент, Н·м; k - коефіцієнт перевантаження, який в середньому $\alpha = 0,8$ можна прийняти рівним 2-2,5; α - коефіцієнт, $\alpha = 0,6$ для нереверсивних машин і для реверсивних.

Розрахунок вала на міцність полягає у визначенні напружень у перерізі кожної його ступені. Для цього необхідно для кожного ступеня визначити згинальний момент з урахуванням перевантаження і момент опору при згині. На ділянках валу, ослаблених шпонковими канавками, момент опору визначається по діаметру d_0 (рис. 8.25).

Згинальний момент, Н·м

- для ділянки валу c

$$M_u = kF_n z_i \quad (8.37)$$

- для ділянки b

$$M_u = kF_n c \left(1 - \frac{y_i}{l}\right) + (G_p + T) \frac{\alpha y_i}{l} \quad (8.38)$$

- для ділянки a

$$M_u = \left[kF_n c + (G_p + T)b \right] \frac{x_i}{l} \quad (8.39)$$

Навантаження від усталеного магнітного тяжіння, Н,

$$T = T_0 / (1 - m) \quad (8.40)$$

Розрахункові значення σ_{np} зіставляють з допустимим для даного матеріалу. Допустиме значення напруги не повинне перевищувати 0,7 межі текучості. Для сталі марки 45 межа текучості дорівнює $3600 \cdot 10^5$ Па.

8.6. Перевірка міцності зубців ротора

Найбільші механічні напруження знаходяться у перерізі основи зубців ротора, де мінімальний їх переріз і діють сили: відцентрові від власної маси і від маси вмісту пазу.

В цьому випадку міцність ніжки зубця визначають по припустимому напруженню розтягу

$$\sigma_{np} < \frac{C'_{zn}}{b_z} \quad (8.41)$$

де $\sigma_{доо} = 120 \text{ МПа}$ - припустиме напруження для електротехнічних сталей;

$C'_{zn} = 5,5(m'_z + m'_{oi})(D_2 - h_n) \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right) \cdot 10^3$ - відцентрова сила зубця і вмісту пазу на 1м

довжини магнітопроводу ротора;

D_2 - зовнішній діаметр ротора;

h_n - висота паза ротора;

$m'_z = 7,8 \cdot b_{zcp} \cdot h_n \cdot K_c \cdot 10^3$ - маса зубця на 1м довжини ротора;

b_{zcp} - середня ширина зубця;

$m'_{oi} = m'_o + m'_i = [8,9q_a \cdot N_n + 2,5(b_n \cdot h_n - q_a \cdot N_n)] \cdot 10^3$ - маса міді обмотки і її ізоляція на 1м довжини ротора;

q_a - переріз міді одного провідника;

b_n - ширина пазу;

N_n - число провідників в пазу.

8.7. Розрахунок клинів пазів ротора

Клини призначені для унеможливлення переміщення вмісту пазів ротора під дією відцентрової сили. Цю силу зосереджують посередині клина, і клин розглядають спочатку як балку із затисненими краями і розраховують на вигин.

Виходячи з припустимого напруження на вигин, знаходять висоту клина (рис. 8.26)

$$h_k \geq 1,22 \sqrt{\frac{c' \cdot b_k}{\sigma_{np}}} \quad (8.42)$$

де $c' = 5,5 \cdot m'_{oi} \cdot (D_2 - h_n) \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3$ - відцентрова сила від вмісту пазу на 1м;

$m'_{oi} = m'_o + m'_i = [8,9 \cdot g_a \cdot N_n + 2,5(b_n \cdot h_n - g_a \cdot N_n) \cdot 10^3]$ - маса міді обмотки і ізоляції у пазу на 1м довжини ротора;

$b_k \approx b_n + (1..3) \cdot 10^{-3}$ - середня ширина клина (рис. 8.26);

σ_{np} - припустиме напруження на згин, яке для гетинаксу приймають 20МПа, для текстоліту - 80МПа, для дерева - 8МПа при розташуванні волокон поперек пазу і 4МПа - вздовж пазу.

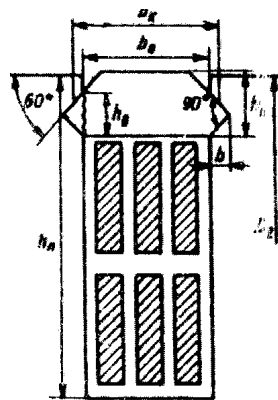


Рис. 8.26.

Далі, використовуючи таблицю з нормованими розмірами клина [2], вибирають нормалізований розмір клина h_k з урахуванням знайденої величини по (8.42), причому висоту клина рекомендують обирати не меншою за $0,25b_n$.

Клин з вибраними розмірами перевіряють на згин і зріз. Напруження на згин уточнюють:

$$\sigma = 1,5 \cdot c' \cdot \frac{b_k}{h_k^2} \quad (8.43)$$

Потім перевіряють на зріз:

$$\tau = 0,5 \frac{c'}{h_0} \quad (8.44)$$

де всі розміри показані на рис. 8.26.

Напруження на згин не повинні перевищувати припустимого, чисельні значення яких наведені вище і використовувалися в (8.41).

Припустимі напруження на зріз залежать від матеріалу клина: для гетинаксу - 10МПа, для текстоліту - 15МПа, для дерева при розкладанні волокон поперек паза - 4МПа, а вздовж - 2МПа.

При розрахункових напруженнях на згин і зріз менше допустимих вважають клин механічно надійним.

8.8. Розрахунок напруг в магнітопроводі ротора

Під дією відцентрових сил, обумовлених обертанням ротору, виникають найбільші напруги у внутрішньої поверхні магнітопроводу. Ці напруги визначають за формулою:

$$\sigma = AD_2 \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2 \cdot \beta \cdot 10^5 \quad (8.45)$$

де D_2 - зовнішній діаметр ротору;

$\beta = \frac{D_2 - 2h_n - d_k}{2H_{\min}}$ - коефіцієнт, що враховує ослаблення перетину листа магнітопро-

воду ротору через наявність шпоночної канавки (з висотою h_{um}), паза (з глибиною h_n) і вентиляційного каналу (з діаметром d_k);

$H_{\min}$ - мінімальна висота ярма;

A - коефіцієнт визначається за табл. 8.3, де прийнято:

$$\varepsilon = \frac{h_n}{D_2} \text{ та } \alpha = \frac{d_6}{D_2 - 2h_n}$$

Таблиця 8.3 - Значення коефіцієнта A

α	ε							
	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2
0.3	0.0201	0.0208	0.0216	0.0225	0.0236	0.0247	0.0262	0.0277
0.4	0.0208	0.0217	0.0227	0.0238	0.0250	0.0263	0.0278	0.0296
0.5	0.0219	0.0230	0.0241	0.0254	0.0269	0.0285	0.0304	0.0324
0.6	0.0237	0.0249	0.0265	0.0282	0.03	0.032	0.0344	0.0369
0.7	0.0259	0.028	0.0303	0.0328	0.0354	0.0382	0.0414	0.044

Розрахована напруженість не повинна перевищувати припустимого значення, яке для електротехнічної сталі приймають 120МПа.

8.9. Перевірка міцності шпонок на роторі

Шпонки призначені для фіксації положення та усунення можливості повороту магнітопроводу ротора під дією моменту обертання.

Шпонки розраховують на зминання робочих поверхонь при найбільшій вели-

чині передавального моменту. Для найбільш поширених призматичних шпонок напруження зминання:

$$\sigma = \frac{kM_n}{0,25d_g h_{um} l_{um}} \quad (8.46)$$

де M_n - номінальний момент;

$k = 2 \dots 3$ - коефіцієнт перевантаження;

h_{um} і l_{um} - висота і довжина шпонки.

Припустиму напруга для шпонок зі сталі Ст5 приймають $\sigma_{don} = 150 \text{ Мпа}$.

8.10. Розрахунок бандажів роторів

У машинах постійного струму з діаметром ротора менше 350 мм, швидкістю обертання не більше 35 м/с і відкритих пазах на активну і лобову частини обмотки накладають дрові бандажі. Вони утримують провідники від радіальних переміщень під дією відцентрових сил (рис. 8.27)

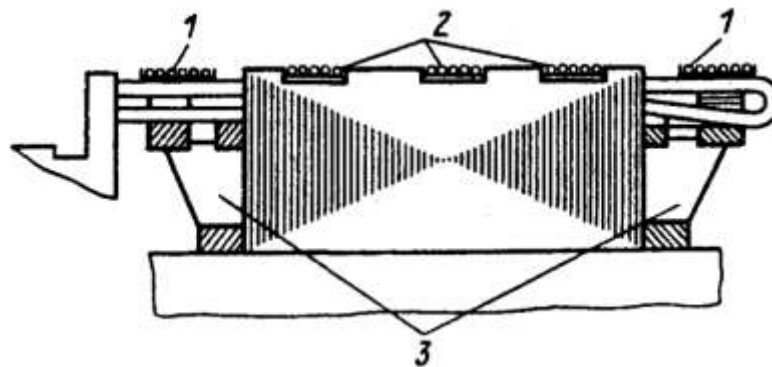


Рис. 8.27. 1- бандажі лобових частин; 2- бандажі на активній частині магнітопроводу; 3- обмоткотримачі.

Бандажі виконують з магнітного (сталевго) або немагнітного дроту. Для утримання пазової частини обмотки бандажі розташовують у канавках в один або два шари. Бандажі в цьому випадку не повинні перекривати більше 35% довжини магнітопроводу, а довжина однієї канавки від 12...20 мм.

Бандажі виконуються з дроту діаметром 0.8...2.0 мм, під який підкладають на лобових частинах обмотки та на поверхні якоря міканіт товщиною 0.3...0.4 мм.

Лобові частини в машинах невеликої потужності бандажують склострічками, просочені синтетичними смолами.

У машинах великої потужності лобові частини кріплять за допомогою дрові бандажів, а пазову частину - клинами.

8.10.1. Розрахунок бандажів з дроту

Загальна кількість витків сталевго дроту, яка розміщується у рівно розподілених канавках по довжині магнітопроводу (рис. 8.28), знаходять за формулою:

$$W_{\delta} = 1,13 \cdot \frac{m(D_2 - h_n)}{d_{\delta}(\sigma_{\text{дон}} - \sigma_0)} \cdot \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 \quad (8.47)$$

де m - сумарна маса провідників і ізоляції пазів, кг;

D_2 - діаметр якоря (ротора), м;

h_n - висота паза, м;

d_{δ} - діаметр дроту бандажа, м;

$\sigma_{\text{дон}} = 450 \text{ МПа}$ - припустиме напруження для сталевого дроту;

n_{max} - максимальна частота обертання, об/хв;

$\sigma_0 = 2,2 \cdot D_2^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^7$ - напруга від відцентрових сил бандажа, Па.

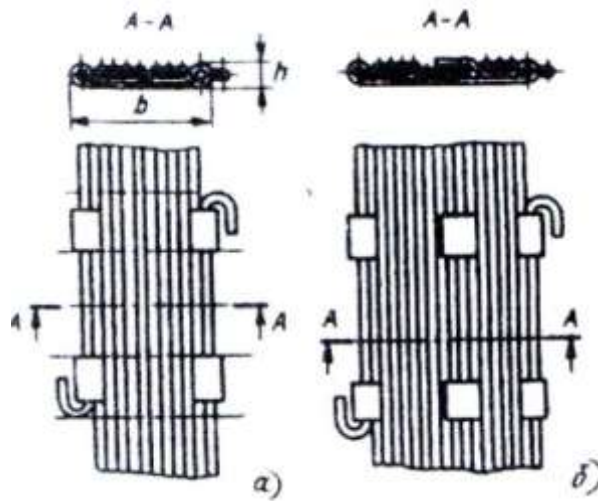


Рис. 8.28. - Кріплення кінців дроту бандажів якоря: а - на магнітопроводі, б - на лобових частинах обмотки

Для визначення кількості витків на лобову частину з одного боку ротора знаходять масу її m_n і використовують (8.47), підставляючи m_n [2].

Скріплюють кінці дроту бандажем за допомогою жерсті у вигляді смужок 8...15 мм і просочують олов'яним припоєм, рис. 8.28.

8.10.1. Розрахунок бандажів з склострічки

Число витків з склострічки визначають за формулою:

$$W_{\delta} = 0,9 \cdot \frac{m(D_2 - h_n)}{q_c(\sigma_{\text{дон}} - \sigma_0)} \cdot \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 \quad (8.48)$$

де q_c - площа поперечного перерізу стрічки;

$\sigma_{\text{дон}}$ - припустима напруга розтягування, дорівнює 150 МПа для склострічки класу нагрівостійкості "В" і 130 МПа - для класу "F";

$\sigma_0 = 0,51 \cdot D_2^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000} \right)^2 \cdot 10^7$ - напруга від склострічки, Па.

Для бандажів застосовують стрічку ЛСБ товщиною 0.18...0.2 мм і шириною 10, 15, 20, 25 і 30 мм. Висоту бандажних канавок на якорі під склострічки виконують від 2 до 3.5 мм.

8.11. Кріплення лобових частин обмоток статора

Прикладом забезпечення механічної міцності у несталих та аварійних режимах машини слугує кріплення лобових частин.

При раптових к.з. чи при пусках машин змінного струму між лобовими частинами статора і ротора виникають електродинамічні зусилля, що відштовхують лобові частини один від одного. Ці сили прагнуть відігнути лобові частини обмотки статора до ярма магнітопроводу статора.

Машини, що виконуються з всипними обмотками, електродинамічні сили порівняно невеликі. В цьому випадку обмежуються ув'язкою шнуром із склотканини лобових частин обмоток статора і ротора і просоченням лаками, що забезпечує монолітність лобових частин.

На лобові частини жорсткої (напівжорсткої) обмотки статора, що виконана з прямокутних провідників, накладають кільцеподібні бандажі, рис. 8.29.

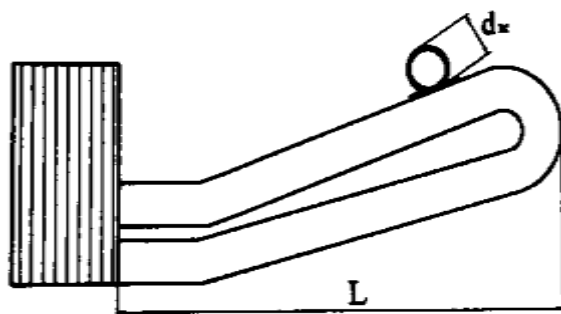


Рис. 8.29. - Кільцеподібні бандажі

Бандажні кільця виконують із прутів прямокутного чи круглого перерізу сталі Ст3. Кільцеподібну форму бандажа отримують ковальським зварюванням.

Машини, що мають діаметр статора більше метра (рис. 8.30), бандажні кільця зварюють з петлями 3, які кріплять до шпильок 1.

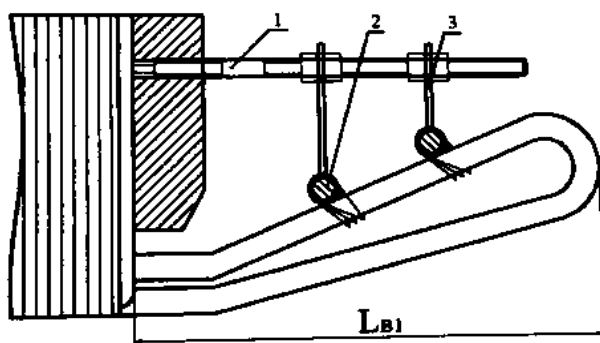


Рис. 8.30. - Кріплення до натискних шайб

Шпильки (кількістю від 2 до 8) кріплять до натискних шайб. Число бандажних кілець залежить від довжини вилиту $L_{в1}$ і висоти паза h , а число шпильок від величини діаметра сердечника [2].

Переріз бандажних кілець обирають по припустимим напруженням розтягування.

В машинах великої потужності, (наприклад, в турбогенераторах) електродинамічні зусилля, що діють на лобові частини обмотки статора достатньо великі. В таких випадках (рис. 8.31) лобові частини 4 кріплять до кронштейнів 2, які з'єднанні натискною шайбою 1.

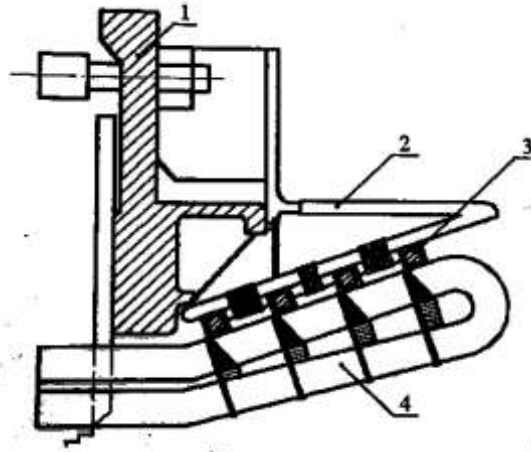


Рис. 8.31. - Кріплення до кронштейнів

Між лобовими частинами обмотки 4 і кронштейном 2 розташовані ізоляційні прокладки 3. Кількість кронштейнів встановлюють від 4-х і більше.

Механічну міцність лобових частин (щоб не було відгину) забезпечують відповідним вибором перерізу бандажних кілець. Переріз кільця обирають по розтягуючому зусиллю, яке виникає при раптовому к.з.:

$$Q_n = \frac{1.11}{m_n} \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot p \cdot x^*} \right)^2 \cdot 10^4 \quad (8.49)$$

де D - внутрішній діаметр осердя статора, м;

$2 \cdot p$ - кількість полюсів машини;

x^* - відносний перехідний реактивний опір обмотки статора.

Для попередніх розрахунків приймають: $x^* = 0,2 \dots 0,3$ – для синхронних машин; $x^* = 0,15 \dots 0,25$ – для асинхронних двигунів к.з. ротором; $x^* = 0,25 \dots 0,4$ – для асинхронних двигунів з фазним ротором.

Для бандажу у вигляді кільця його діаметр

$$d_K \geq \sqrt{\frac{4 \cdot Q_K}{\pi \cdot \sigma}} \quad (8.50)$$

де $\sigma = 180 \cdot 10^6 \text{ Па}$ - припустима напруга розтягу для сталі марки Ст3 при доброякісному ковальському зварюванні.

Розрахунок кріплення лобових частин потужних турбогенераторів (рис. 8.31) більш складний.

Наведені вище у конспекті приклади механічних розрахунків не торкаються багатьох інших деталей та вузлів. У [2] викладені розрахунки кріплення осердя магнітопроводів за допомогою втулок з тугою посадкою, кріплення потоків та обмоток збудження синхронних машин, колекторів машин постійного струму, контактних

кілець асинхронних машин з фазним ротором та інші.

У разі потреби визначення механічної міцності можна використовувати методику розрахунків у [2] та спеціальній літературі.

Післямова

У конспекті викладені основні напрями розрахунків на час проектування електричних машин, що мусить студента використовувати довідкові джерела. Між тим зміст конспекту включає матеріал додаткових питань, які пропонують для самостійного вивчення, що привело до збільшення об'єму конспекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Постников И.М. Проектирование электрических машин. – Киев: Гостехиздат УССР, 1960. – 910 с.
2. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин / Под редакцией И.П. Копылова. – М.: Энергия 1980.-486с.
3. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. / Под редакцией О.Д. Гольдберга. 2-е изд., перераб. И доп. – М: Высш.шк. 2001-430с.
4. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. – Л.: Энергия, 1968.-731с.
5. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. – Л.: Госэнергоиздат, 1958.-426с.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978.-832с.
7. Асинхронные двигатели общего назначения. / Под ред. В.М. Петрова и А.И. Кравчика. – М.: Энергия, 1980.-488с.
8. Готер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1961.-480с.
9. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974.-560с.
10. Асинхронные двигателя серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. – М.: Энергоиздат, 1982.-504с.
11. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1987., Ч1, Ч2.