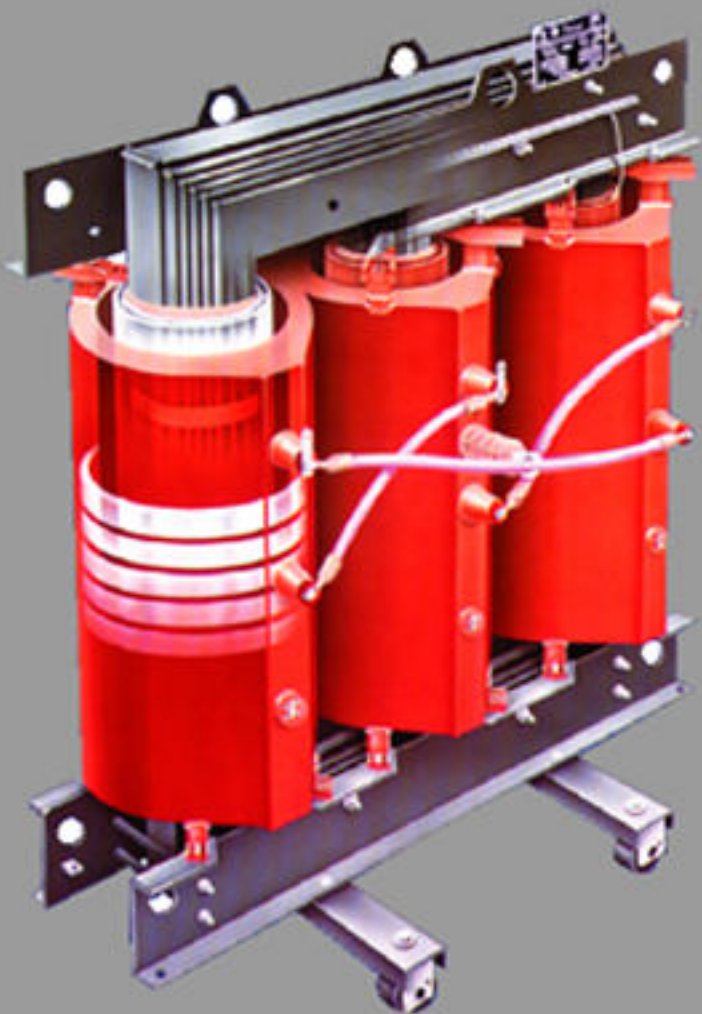


*Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»*

*М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва
за редакцією В. І. Мілих*

Електричні машини і трансформатори



*Харків
2017*

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

М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І ТРАНСФОРМАТОРИ

Навчальний посібник
для студентів, що навчаються
за галуззю знань «Електрична інженерія»
за ред. В.І. Мілих

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 3 від 22.12.2016 р.

Харків
НТУ «ХПІ»

2017

УДК 621.3
ББК 31.26
О 76

Рецензенти:

М. М. Заблодський, д-р техн. наук, професор, НУБіП України
В. Є. Плюгін, , д-р техн. наук., доцент, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

Осташевський М. О.

О 76 Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.

ISBN 978-617-7541-11-9

Розглянуто принципи дії та будову обертових електричних машин і силових трансформаторів, надано пояснення основних процесів, що відбуваються в електричних машинах і трансформаторах при перетворенні енергії. Проведено аналіз їх роботи, пояснено характеристики електричних машин і трансформаторів, наведено співвідношення між величинами, розглянуто експлуатаційні властивості різних типів електричних машин і трансформаторів.

Призначений для студентів вищих навчальних закладів.

Іл. 372. Табл. 10. Бібліогр. 11 назв

УДК 621.3

ББК 31.26

ISBN 978-617-7541-11-9 © М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва, 2017

ВСТУП

Електро механічне перетворення енергії є одним із визначних проявів закону збереження енергії в природі і реалізується в системах як природного, так і антропогенного походження. Це явище досить добре вивчено і широко використовується для різноманітних практичних цілей. Сьогодні створено величезну кількість різноманітних технічних пристроїв, які називаються *електромеханічними перетворювачами енергії*. Вони істотно відрізняються один від одного своїм функціональним призначенням, потужністю, швидкістю рухомих частин, конструктивним виконанням та іншими параметрами.

Найважливішим класом електро механічних перетворювачів є так звані енергетичні електричні машини, призначені для ефективного перетворення механічної енергії на електричну або електричної енергії на механічну. Енергетичні електричні машини (далі просто електричні машини) є важливою складовою сучасних систем генерування і споживання електричної енергії. Практично вся електроенергія в світі створена генераторами електричної енергії, а основним її споживачем є електричні двигуни, що призводять до руху різноманітні пристрої, механізми, транспортні засоби, верстати, побутову та офісну техніку тощо.

У системах розподілу електричної енергії застосовуються електротехнічні пристрої, які отримали назву трансформаторів електричної енергії (далі просто трансформатори). Процеси перетворення електричної енергії з одними параметрами на електричну енергію з іншими параметрами, що відбуваються в трансформаторах, подібні до процесів перетворення енергії в електричних машинах, тому електричні машини і трансформатори вивчаються разом.

У процесі розвитку електромеханіки потреби практики вимагали створення теорії електричних машин і трансформаторів, яка повинна була не тільки пояснити фізичні явища, що відбуваються в цих пристроях, але й дати досить достовірні кількісні співвідношення між параметрами і характеристиками електричних машин і трансформаторів, що створювало б основу для їхнього розрахунку і проектування.

Зусиллями таких видатних вчених-електромехаників, як Р. Ріхтер, Р. Парк, О. О. Горєв, Г. Крон, М. П. Костенко, Л. М. Піотровський, Б. Адкінс, Г. М. Петров, О. І. Важнов, О. І. Вольдек, К. Ковач, І. Рац, І. М. Постніков, І. П. Копилов, А. В. Іванов-Смоленський та інших, було створено теорію, яку можна назвати класичною теорією електричних машин. У класичній теорії розглядаються найбільш поширені конструкції електричних машин і трансформаторів. Це насамперед силові трансформатори, асинхронні та синхронні машини змінного струму, колекторні машини постійного струму.

Книга призначена як навчальний посібник з дисципліни «Електричні машини» для студентів, що навчаються за галуззю знань «Електрична інженерія».

Викладення матеріалу розпочинається із загальних відомостей про електричні машини і трансформатори, далі наведено відомості з трансформаторів, асинхронних та синхронних машин, машин постійного струму. Низку загальних питань теорії електричних машин змінного струму виділено до окремого розділу. За кожним типом електричних машин та для трансформаторів спочатку розглянуто основи конструкції, потім – питання теорії та характеристики.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам книги:

Заблудському Миколі Миколайовичу, професору, доктору технічних наук, професору кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Плюгину Владиславу Євгеновичу, доценту, доктору технічних наук, професору кафедри Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1. Принципи перетворення енергії в електричних машинах

Електричні машини і трансформатори мають надзвичайно широке застосування в різноманітних галузях промисловості, сільському господарстві, в енергетиці, на транспорті, в авіації, в морському та річковому флоті, медицині, побуті і т. д. Існує велика різноманітність електричних машин. Вони відрізняються за принципом дії, потужністю, характеристиками. Розміри електричних машин змінюються в широких межах. Є машини, декілька штук яких можуть розташуватися у наперстку, а є машини, діаметр яких перевищує 16 метрів. Кількість трансформаторів незліченна, бо електрична енергія при передаванні від виробника до споживача перетворюється до 10 разів.

Електрична машина є електромеханічним перетворювачем енергії, який може перетворювати механічну енергію на електричну та навпаки. Ті електричні машини, в яких відбувається перетворення механічної енергії на електричну, називаються *електричними генераторами*, а машини, в яких здійснюється перетворення електричної енергії на механічну, називаються *електричними двигунами*.

Трансформатор є електростатичним пристроєм, який перетворює одну систему електричних величин на іншу.

Робота трансформатора ґрунтується на фізичному законі електромагнітної індукції. Робота електричної машини базується на фізичних законах електромагнітної індукції та електромагнітних сил.

При поясненні процесів, що виникають в електричній машині або трансформаторі, використовуються два формулювання закону електромагнітної індукції: рівняння Максвелла та рівняння Фарадея.

Згідно із рівнянням Максвелла, змінювання магнітного потоку Φ , зчепленого з замкнутим контуром, у часі t наводить у цьому контурі електрорушійну силу (ЕРС) електромагнітної індукції e :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.1)$$

Згідно з рівнянням Фарадея в провіднику довжиною l , що пересувається зі швидкістю v в однорідному магнітному полі перпендикуляр-

температура для класу F становить 155°C , для класу H – 180°C , для класу C – більше 180°C . До класу F відносяться плівкові матеріали на основі слюди та скла з синтетичними смолами, наприклад, склолакотканина, склострічка, склотекстоліт, плівкосинтокартон, імідофлекс, синтофолій F та ін. До класу H належать плівкові матеріали на основі слюди та скла з кремнійорганічними смолами, наприклад, плівкосклопласт, синтофолій H, плівка поліімідна та ін. До класу C належать слюда, фосфор, кварц, що використовуються без сполучних матеріалів або з елементоорганічними сполучними речовинами.

Під впливом тепла, вібрацій та інших фізико-хімічних факторів відбувається старіння ізоляції, тобто поступова втрата нею механічної та електричної міцності, навіть при температурах, нижчих за гранично допустиму. Це явище враховується при визначенні строку служби електричних машин і трансформаторів.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення електричної машини і трансформатора.
2. На яких законах ґрунтується робота електричної машини і трансформатора?
3. Як формулюється закон електромагнітної індукції?
4. Коли застосовуються правила правої та лівої руки?
5. Як формулюється закон Ампера?
6. Поясніть роботу елементарного електричного генератора.
7. Поясніть роботу елементарного електричного двигуна.
8. Як формулюється принцип оборотності електричних машин?
9. Наведіть конструктивну схему електричної машини.
10. Які частини електричної машини називаються якорем та індуктором?
11. На яких законах електромеханіки базується класична теорія електричних машин?
12. Наведіть класифікаційні ознаки електричних машин.
13. Що називається номінальним режимом електричної машини або трансформатора?
14. Що називається номінальною потужністю електричного двигуна, електричного генератора, трансформатора?
15. Для яких елементів електричних машин і трансформаторів використовуються конструктивні, активні та ізоляційні матеріали?

2. ТРАНСФОРМАТОРИ

2.1. Загальні відомості

Силовий трансформатор (рис. 2.1) – це статичний електро-магнітний пристрій, який має дві або більше обмотки та призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінних напруги та струму в одну або декілька інших систем змінних напруги та струму, які мають інші значення при тій самій частоті. За допомогою трансформаторів також можна змінювати частоту, кількість фаз, форму вихідної напруги.

Електрична енергія виробляється на електричних станціях при напругах від 6 до 30 кВ, а передача електроенергії на довгі відстані здійснюється при значно більших напругах – 220, 330, 400, 500, 750, 1150 кВ. Тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, що збільшують напругу.

Розподілення електричної енергії між промисловими підприємствами, містами, сільськими районами, а також всередині промислових підприємств здійснюється по повітряних та кабельних лініях електропередачі напругою 110, 220, 380 В; 10,6; 20; 35 кВ. Отже, в усіх вузлах розподільних мереж повинні встановлюватися трансформатори, що знижують напругу. Такі трансформатори також необхідно встановлювати безпосередньо у споживачів електроенергії, тому що більшість споживачів змінного струму працюють при напругах 220, 380, 660 В.

Таким чином, електрична енергія при передаванні від електричних станцій до споживачів зазнає багаторазової трансформації. На кожний кіловольт-ампер встановленої генераторної потужності припадає 7–8 кВ·А трансформаторної потужності.



Рисунок 2.1 – Трифазний силовий трансформатор

2.2. Класифікація трансформаторів

Класифікація трансформаторів відбувається за призначенням.

Силові трансформатори використовують у мережах енергетичних

6) при з'єднанні точок O та A отримується вектор $\underline{U}'_s$;

7) визначається $\Delta u\%$ за рівнянням:

$$\Delta u\% = \frac{OC - OA}{OC} \cdot 100\% . \quad (2.143)$$

Повторюючи низку побудов для різних $\cos \varphi_s$, можна отримати залежність $\Delta u\%(\cos \varphi_s)$ при $\beta = \text{const}$ (рис. 2.45) та залежність $\Delta u\%(\beta)$ при $\cos \varphi_s = \text{const}$ (рис. 2.46).

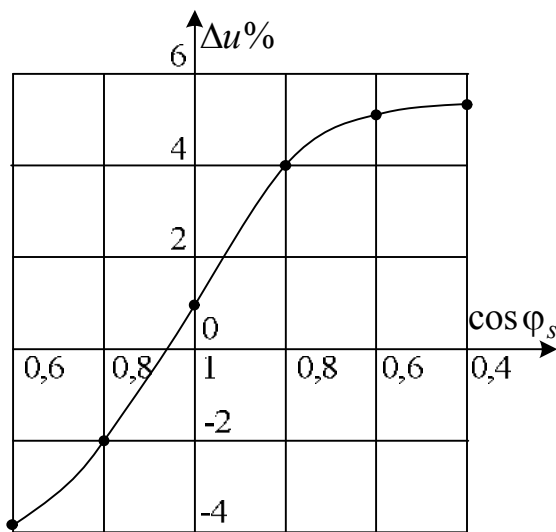


Рисунок 2.45 – Залежність $\Delta u\%(\cos \varphi_s)$ при $\beta = \text{const}$ для трансформатора з $u_{ka}\% = 1,2\%$ та $u_{kr}\% = 5,36\%$

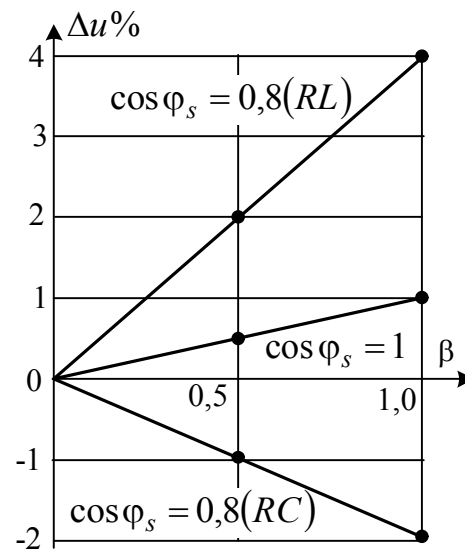


Рисунок 2.46 – Залежність $\Delta u\%(\beta)$ при $\cos \varphi_s = \text{const}$ для трансформатора з $u_{ka}\% = 1,2\%$ та $u_{kr}\% = 5,36\%$

2.20. Зовнішня характеристика трансформатора

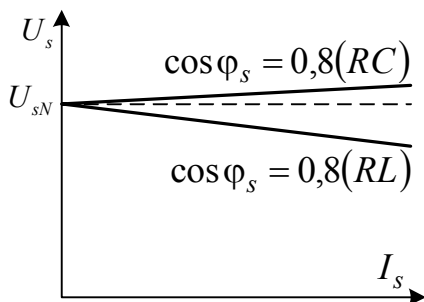


Рисунок 2.47 – Зовнішня характеристика трансформатора

Зовнішня характеристика являє собою залежність напруги вторинної обмотки від струму вторинної обмотки $U_s(I_s)$ при $\cos \varphi_s = \text{const}$ (рис. 2.47). Вона показує, як змінюватиметься напруга на вторинній обмотці при змінюванні навантаження. Зовнішня характеристика є найважливішою експлуатаційною характеристикою трансформатора. Зовнішня характеристи-

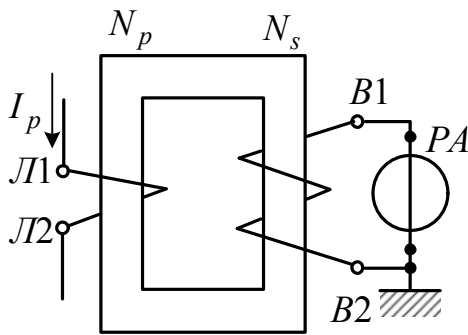


Рисунок 2.75 – Схема вимірювального трансформатора струму

матор виконується, як правило, багатограничним.

Під час роботи трансформатора струму категорично забороняється розмикання вторинної обмотки. При замкненій вторинній обмотці МРС первинної обмотки $I_p N_p$ та МРС вторинної обмотки $I_s N_s$ взаємозрівноважені. Магнітний потік в осерді дуже малий. При розмиканні вторинної обмотки МРС $I_s N_s = 0$.

А МРС $I_p N_p$ залишається незрівноваженою, при цьому величина цієї МРС визначається струмом лінії I_p , який не змінюється. Тому результуючий магнітний потік в осерді зростає в десятки, сотні разів. ЕРС вторинної обмотки може досягати декількох тисяч вольт, що небезпечно для обслуговуючого персоналу та ізоляції. Істотне збільшення магнітного потоку призводить до різкого збільшення магнітних втрат, перегрівання осердя до самого його розплавлення.

Контрольні запитання

1. За якими ознаками класифікуються трансформатори?
2. Дайте визначення силового трансформатора.
3. Що зазначається на таблиці номінальних даних силового трансформатора?
4. Наведіть електромагнітну схему найпростішого трансформатора і поясніть призначення його елементів.
5. У чому полягає принцип дії трансформатора?
6. Що таке коефіцієнт трансформації та як він зв'язує напруги та струми обмоток трансформатора?
7. Які конструкції магнітопроводів застосовуються у трансформаторах?
8. Які типи обмоток застосовуються у трансформаторах?
9. Як здійснюється охолодження трансформаторів?
10. Як визначається амплітуда магнітного потоку трансформатора?
11. Яка мета і порядок магнітного розрахунку трансформатора?

-
12. Поясніть магнітну характеристику трансформатора.
 13. Як визначаються величина та форма струму неробочого ходу трансформатора?
 14. Для чого використовується зведений трансформатор?
 15. Наведіть рівняння МРС, струмів та напруг трансформатора в режимах неробочого ходу, короткого замикання та навантаження.
 16. Наведіть схеми заміщення та векторні діаграми трансформатора в режимах неробочого ходу, короткого замикання та навантаження.
 17. Яким чином проводяться досліди неробочого ходу та короткого замикання трансформатора та які характеристики отримують за даними цих дослідів?
 18. Поясніть характеристики неробочого ходу та короткого замикання трансформатора.
 19. Як визначається трикутник короткого замикання трансформатора?
 20. Які втрати потужності виділяються в трансформаторі, яка їх фізична природа?
 21. Наведіть енергетичну діаграму трансформатора.
 22. Як визначити ККД трансформатора за дослідом неробочого ходу та короткого замикання?
 23. За якої умови ККД трансформатора буде максимальним?
 24. Які властивості трансформатора характеризує напруга короткого замикання?
 25. Для чого використовується зовнішня характеристика трансформатора?
 26. Як визначити зміну напруги трансформатора в режимі навантаження в інженерних розрахунках?
 27. Як виконуються магнітопроводи трифазних трансформаторів?
 28. Як виконується трансформаторна група?
 29. Як розподіляється магнітний потік між стрижнями та ярмами трифазного стрижньового трансформатора?
 30. Як впливає схема з'єднання обмоток трифазних трансформаторів на їх роботу?
 31. Як визначається група з'єднань трансформатора?
 32. В якому випадку застосовують визначення полярності трансформатора?
 33. Від яких чинників залежить група з'єднань трансформатора?

-
34. Як отримати парні та непарні групи з'єднань трансформатора?
 35. Які групи з'єднань застосовують в однофазних та трифазних трансформаторах?
 36. Як визначити групу трансформатора, якщо відома схема з'єднань обмоток?
 37. В яких випадках використовується паралельна робота трансформаторів?
 38. Які умови включення трансформаторів до паралельної роботи?
 39. Чому трансформатори повинні мати однакові коефіцієнти трансформації?
 40. Чому трансформатори повинні мати однакові напруги короткого замикання?
 41. Чому трансформатори повинні мати однакові групи з'єднань обмоток?
 42. Яка умова підключення трансформаторів на паралельну роботу повинна виконуватись точно?
 43. На які умови підключення трансформаторів на паралельну роботу допускаються відхилення?
 44. Як визначити зрівняльний струм між двома паралельно працюючими трансформаторами в інженерних розрахунках?
 45. Як розподіляється навантаження між двома паралельними працюючими трансформаторами при неоднаковості напруг короткого замикання?
 46. Які особливості конструкції багатообмоткових трансформаторів?
 47. Наведіть рівняння напруг багатообмоткового трансформатора?
 48. Як визначаються коефіцієнти трансформації та зведення багатообмоткового трансформатора?
 49. Які схеми з'єднання обмоток та групи трансформаторів передбачаються стандартом для триобмоткових трансформаторів?
 50. Які особливості конструкції автотрансформаторів?
 51. Наведіть рівняння напруг автотрансформатора?
 52. Які потужності розрізняють у автотрансформаторі?
 53. Яке призначення вимірювальних трансформаторів?
 54. Як конструктивно виконуються трансформатори напруги і струму?
 55. В яких режимах працюють трансформатори напруги і струму?

3. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1. Принципи виконання обмоток машин змінного струму

3.1.1. Загальні положення

Безколекторні машини змінного струму (асинхронні та синхронні), відрізняючись за принципом дії, мають конструктивну схожість, а їх теорія спирається на низку загальних питань стосовно робочої обмотки.

Робоча обмотка – це та обмотка, у якій наводиться ЕРС і протікає робочий струм. У значній більшості випадків у машинах постійного струму робоча обмотка розміщується на нерухомому статорі. Тому надалі робочу обмотку будемо розуміти як обмотку статора.

Обмотки статора, що застосовуються в класичних конструкціях машин змінного струму, розглядаються в такій послідовності:

- 1) будова обмотки статора;
- 2) наведення ЕРС в обмотці статора;
- 3) створення обмоткою статора обертового магнітного поля.

3.1.2. Призначення обмоток статора

Призначення обмоток статора в асинхронних та синхронних машинах однакове.

У режимі генератора обмотка статора магнітно зчеплена з обертовим магнітним полем, яке наводить у ній ЕРС. У результаті на затискачах генератора з'являється напруга.

У режимі двигуна обмотка статора приєднується до мережі змінного струму, створює обертове магнітне поле, взаємодія якого з ротором приводить до виникнення обертового електромагнітного моменту машини.

Найпростішим елементом обмотки є секція. Секція може складатися з одного витка (одновиткова секція) та з багатьох витків (багатовиткова секція).

Частини секції, що знаходяться в пазу, називаються пазовими частинами (рис. 3.1). Частини секції, що з'єднують пазові частини, називаються лобовими частинами. Ті частини секції, що знахо-



Рисунок 3.1 – Статор машини змінного струму з обмоткою

В інженерній практиці для створення обмоток використовуються схеми-розгортки обмоток: коло статора розгортається в площину, секції обмотки зображуються геометричними фігурами певної форми.

Порядок побудови схеми-розгортки (рис. 3.13)

1. Прямими лініями зображуються пази та нумеруються.
2. Пази рівномірно розбиваються на полюсні кроки, кількість полюсних кроків дорівнює кількості полюсів $2p$.

3. Пази на кожному полюсному кроці поділяються на фазні зони відповідно до чергування фазних зон $A-Z-B-X-C-Y$ та величини q (фазні зони позначені дужками та літерами).

4. Відповідно до розбивки пазів та кроку обмотки y будується перша секція фази $AХ$ відповідної форми. Перша секція складається з провідника першого паза та провідника сьомого паза ($1 + y = 1 + 6 = 7$). Друга секція складається з провідників другого та восьмого пазів ($2 + y = 2 + 6 = 8$).

Перша та друга секції з'єднуються послідовно та створюють першу секційну групу фази $AХ$. П1, К1 – початок та кінець першої секційної групи відповідно.

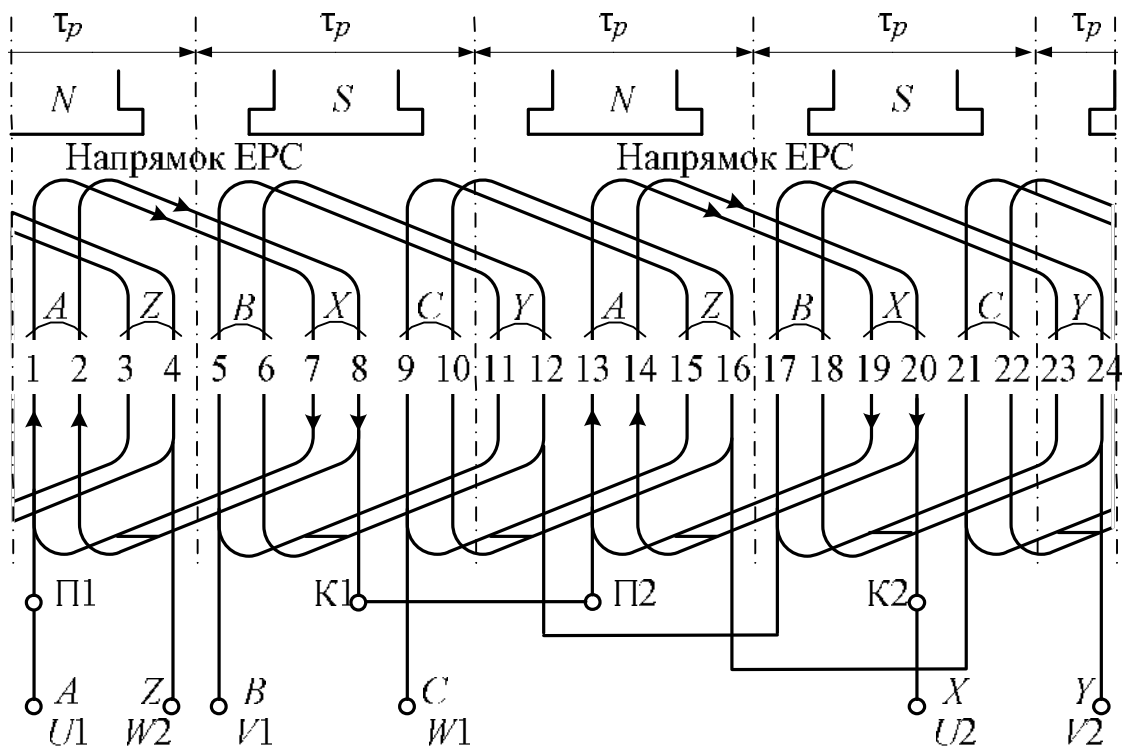


Рисунок 3.13 – Схема-розгортка шаблонної обмотки

N_{sec} та діаметральним кроком

$$\begin{aligned} E_{sec1} &= 2N_{sec} \cdot E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot N_{sec} = \\ &= \pi\sqrt{2} \cdot \Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot N_{sec}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Діюче значення першої гармоніки ЕРС секції з укороченим кроком

$$E_{secp1} = E_{sec1} \cdot K_{p1} = \pi\sqrt{2} \cdot \Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot N_{sec} \cdot K_{p1}. \quad (3.38)$$

Діюче значення першої гармоніки ЕРС секційної групи для q_s секцій, що входять до секційної групи,

$$E_{sg1} = E_{secp1} \cdot K_{d1} = \pi\sqrt{2} \cdot \Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot N_{sec} \cdot q_s \cdot K_{p1} \cdot K_{d1}. \quad (3.39)$$

Обмотковий коефіцієнт першої гармоніки

$$K_{W1} = K_{p1} \cdot K_{d1}. \quad (3.40)$$

Для фазної двошарової обмотки з $2p$ секційних груп у фазі, q_s секцій в секційній групі, кількість витків фазної обмотки, з'єднаних послідовно,

$$N = 2p \cdot q_s \cdot N_{sec}. \quad (3.41)$$

У загальному випадку секційні групи можуть бути об'єднані різними способами (послідовно, паралельно, комбіновано).

Діюче значення першої гармоніки ЕРС фазної обмотки

$$\begin{aligned} E_{\phi 1} &= \pi\sqrt{2} \cdot 2p \cdot q_s \cdot N_{sec} \cdot \Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot K_{W1} = \\ &= \pi\sqrt{2} \cdot \Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot N \cdot K_{W1} \approx 4,44\Phi_{\delta \max 1} \cdot f_1 \cdot N \cdot K_{W1}. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Для отримання формули діючого значення вищих гармонік ЕРС фазної обмотки виконуються дії, аналогічні (3.31)–(3.42), але з урахуванням відмінності деяких величин.

Частота ν -ї гармоніки

$$f_{\nu} = \nu \cdot f_1. \quad (3.43)$$

Полісний крок ν -ї гармоніки

$$\tau_{p\nu} = \frac{\tau_p}{\nu}. \quad (3.44)$$

полюсами (машина постійного струму або обернена синхронна машина) (рис. 3.46).

Магнітний потік кожного полюса має дві складові: основний (корисний) магнітний потік Φ_δ і магнітний потік розсіяння Φ_σ :

$$\Phi = \Phi_\delta + \Phi_\sigma. \quad (3.132)$$

Основний магнітний потік Φ_δ перетинає повітряний проміжок, надходить до обертового ротора, бере участь у корисному перетворюванні енергії. Магнітний потік розсіяння Φ_σ не перетинає повітряного проміжку, не бере участі у корисному перетворюванні енергії.

Кількісна оцінка магнітного потоку розсіяння здійснюється за допомогою коефіцієнта розсіяння

$$k_\sigma = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_\delta}. \quad (3.133)$$

Величина коефіцієнта k_σ становить 1,1–1,25.

Осі сусідніх полюсів розбивають магнітну систему на однакові розрахункові частини. Магнітний розрахунок ведеться для однієї розрахункової частини, тому що магнітна система є симетричною. До розрахункової частини машини постійного струму входять два полюси, тобто магнітний розрахунок ведеться на пару полюсів (рис. 3.47).

Магнітний розрахунок електричних машин ґрунтується на законі повного струму (2.30).

Для магнітного розрахунку електричних машин припускається таке:

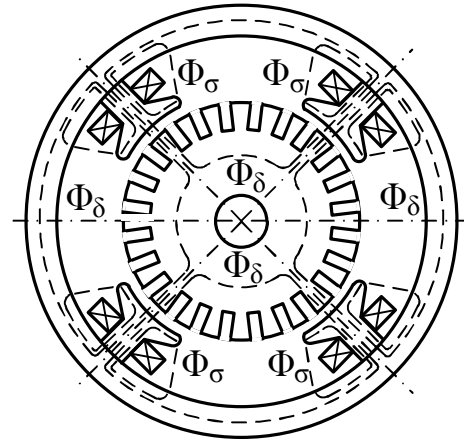


Рисунок 3.46 – Магнітне коло чотириполюсної машини постійного струму

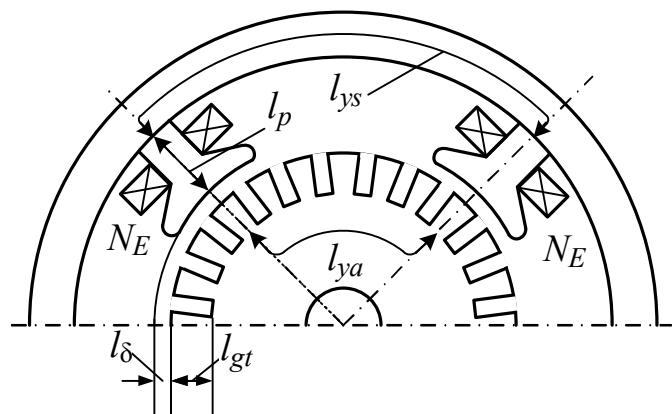


Рисунок 3.47 – Розрахункова частина магнітного кола машини постійного струму

ротора (якоря) $U_{ya} = 1-3 \%$; магнітна напруга осердя полюса $U_p = 5-10 \%$; магнітна напруга станини $U_{ys} = 5-10 \%$.

За величиною МРС неробочого ходу F_o визначається необхідна величина струму збудження.

Для машин постійного струму та синхронних машин обмотка збудження живиться постійним струмом. МРС обмотки збудження

$$F_o = 2I_E N_E. \quad (3.158)$$

Струм збудження машини постійного струму або синхронної машини

$$I_E = \frac{F_o}{2N_E}. \quad (3.159)$$

Для асинхронних машин обмотка статора одночасно є й обмоткою збудження, тобто вона створює основне магнітне поле. Частина струму обмотки статора є струмом збудження або намагнічувальним струмом асинхронної машини I_{sm} . МРС неробочого ходу визначається як перша гармоніка МРС.

Струм збудження асинхронної машини з (3.97)

$$I_{sm} = \frac{F_o \cdot \pi p}{m_s \sqrt{2} N_s \cdot K_{Ws}}. \quad (3.160)$$

Контрольні запитання

1. Дайте визначення робочої обмотки електричної машини.
2. Яке призначення мають обмотки статора в генераторах та двигунах змінного струму?
3. За якими ознаками класифікуються обмотки статора машин змінного струму?
4. Які частини секції називаються пазовими та лобовими?
5. Порівняйте жорсткі та м'які секції обмотки статора.
6. З яких елементів складається обмотка статора?
7. Який порядок чергування фазних зон обмотки статора машин змінного струму?
8. Як визначається кількість пазів, яку займає обмотка статора?
9. Як визначаються діаметральний та укорочений крок обмотки

статора?

10. Яку форму мають секції одношарових обмоток?

11. Як визначаються кроки концентричної одношарової обмотки статора?

12. Яку форму мають секції двошарових обмоток?

13. Як будується схема-розгортка одношарової обмотки?

14. Як будується схема-розгортка двошарової обмотки?

15. Як складається таблиця розподілу секцій і груп по пазах двошарової обмотки з дробовою кількістю пазів на полюс і фазу?

16. Як впливає на величину і форму ЕРС укорочення кроку обмотки?

17. Як визначається коефіцієнт укорочення обмотки?

18. Як впливає на величину і форму ЕРС розподілення обмотки?

19. Як визначається коефіцієнт розподілення обмотки?

20. Як визначається обмотковий коефіцієнт?

21. Як впливає схема з'єднання фазних обмоток на лінійну ЕРС обмотки статора?

22. Як визначаються номери зубцевих гармонік ЕРС?

23. Для чого використовують скіс пазів на статорі або роторі?

24. Як визначається коефіцієнт скосу?

25. Як визначається ЕРС фазної розподіленої обмотки з укороченим кроком та скосом пазів?

26. Як визначається діюче значення v -ої гармоніки ЕРС фазної обмотки?

27. Яких умов необхідно дотримуватись при виконанні обмоток статора машин змінного струму?

28. Як визначається МРС зосередженої обмотки?

29. Як визначається кількість полюсів магнітного поля, створеного вищими гармоніками МРС?

30. Як визначається МРС одношарової розподіленої фазної обмотки?

31. Як визначається МРС двошарової фазної обмотки з укороченим кроком?

32. Як виникають пульсуюча та обертова хвилі МРС?

33. Як визначаються обертові хвилі першої та вищих гармонік МРС трифазної обмотки?

34. Як визначаються номери прямо та зворотно обертових хвиль

вищих гармонік МРС фазних обмоток?

35. Складіть спектр гармонік МРС трифазної обмотки.

36. На які просторові частини поділяється магнітне поле електричної машини?

37. Що враховує коефіцієнт Картера?

38. Що враховує коефіцієнт насичення?

39. Як визначаються головні індуктивні опори машини змінного струму?

40. Як визначаються індуктивні опори розсіювання машини змінного струму?

41. Для чого застосовується магнітний розрахунок електричної машини?

42. З яких ділянок складається магнітне коло електричної машини?

43. Що визначає коефіцієнт розсіювання?

44. На якому законі ґрунтується магнітний розрахунок електричної машини?

45. За яких припущень виконується магнітний розрахунок електричної машини?

46. Що характеризує коефіцієнт полюсного перекриття?

47. Як визначається магнітна напруга повітряного проміжку з урахуванням наявності зубців і вентиляційних каналів на статорі та роторі?

48. Що враховує зубцевий коефіцієнт при розрахунку магнітної індукції в зубцевому шарі електричної машини?

49. Як визначається магнітна індукція в зубці електричної машини?

50. Як визначаються магнітні напруги в спинці ротора, осерді полюса та станині електричної машини?

51. Поясніть вигляд магнітної характеристики електричної машини.

52. Як визначається ненасичена магнітна характеристика електричної машини?

53. Як визначається коефіцієнт насичення електричної машини?

54. Яка ділянка магнітного кола електричної машини є найнасиченішою?

55. Як визначаються струми збудження синхронної, асинхронної машин та машини постійного струму?

4. АСИНХРОННІ МАШИНИ

4.1. Загальні відомості

Асинхронні машини – найбільш поширені електричні машини. Особливо широко вони використовуються як електричні двигуни і є основними перетворювачами електричної енергії на механічну.

Найбільший вклад у створенні асинхронних двигунів зробив М.Й. Доливо-Добровольский. У 1889 році він уперше використав трифазний струм для отримання обертового магнітного поля застосував на статорі розподілену трифазну обмотку й обмотку ротора у вигляді білячої клітки. Він також запропонував трифазну обмотку ротора, виведену на контактні кільця, і використав для пуску двигуна реостат, підключений до обмотки ротора за допомогою контактних кілець.

Сьогодні асинхронні двигуни споживають понад половину усієї виробленої у світі електроенергії і широко застосовуються як електропривод більшості виробничих механізмів. Це пояснюється простотою конструкції, надійністю і високим значенням ККД таких двигунів, здатністю автоматично змінювати обертальний момент відповідно до змінювання навантажувального моменту на валу, низькою вартістю. Найбільшого поширення здобули асинхронні двигуни номінальною потужністю від 0,75 до 100 кВт. Вони споживають більше 90 % загального споживання електроенергії асинхронними двигунами.

Крім асинхронних двигунів для виробничих механізмів набули широкого поширення і модифікації асинхронних машин, а саме: асинхронні двигуни електропобутових пристроїв, асинхронні виконавчі двигуни, тахогенератори, сельсини, поворотні трансформатори та ін.

Серед електричних машин асинхронні генератори поширені найменше. Асинхронні генератори застосовуються в автономних електроустановках, а останнім часом набули поширення в малій енергетиці.

4.2. Паспортні дані асинхронних машин

Кожна асинхронна машина обладнується табличкою номінальних даних, на якій зазначаються:

1) номінальна потужність для двигунів P_N у кіловатах (кВт) – механічна потужність на валу двигуна.

Номінальна повна потужність для генераторів S_N у кіловольт-

4.4. Конструкція асинхронних машин

Асинхронні двигуни є найпоширенішими серед асинхронних машин, тому конструкція їх розглядається на прикладі асинхронного двигуна найбільш поширеного виконання (рис. 4.2).

Обертальний момент асинхронного двигуна передається за допомогою вала 1, який встановлюється в підшипниках 2, розташованих з обох боків вала. Зовнішніми обоймами підшипники кріпляться в підшипникових щитах 3, які забезпечують горизонтальне розташування осі вала за допомогою спеціального кріплення в корпусі статора 5.

Для підведення живлення до двигуна на корпусі статора розташовується коробка виведень 4. В корпусі статора закріплюється осердя статора 6 з обмоткою 10. На вал напресовується осердя ротора 7 з обмоткою 8. Для охолодження двигуна використовуються лопатки на роторі 9 та вентилятор зовнішнього обдування 11, який обов'язково закривається захисним кожухом 12. Корпус статора забезпечується ребрами охолодження 13. До фундаменту асинхронний двигун кріпиться за допомогою лап 14.

Залежно від конструкції ротора асинхронні двигуни поділяються на асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором та асинхронні двигуни з фазним ротором.

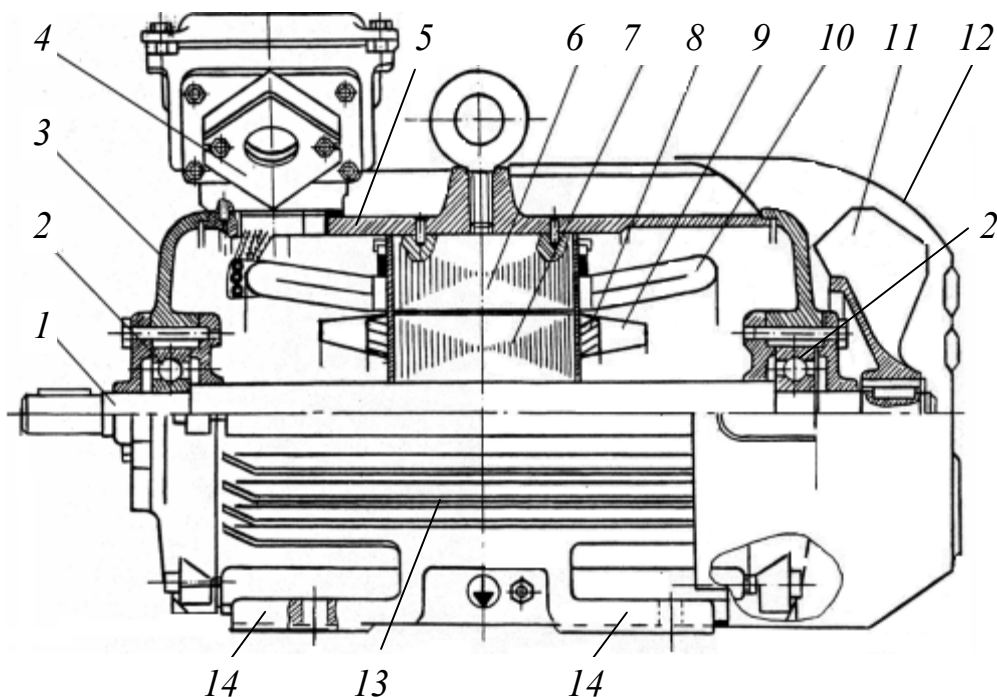


Рисунок 4.2 – Асинхронний двигун з оребреним корпусом та зовнішнім повітряним охолодженням за допомогою вентилятора

$$= \frac{\underline{U}_s}{\underline{Z}_s \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_s}{\underline{Z}_m}\right) + \underline{Z}'_{rs} \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_s}{\underline{Z}_m}\right)^2} = \frac{\underline{U}_s}{\underline{c} \cdot \underline{Z}_s + \underline{c}^2 \cdot \underline{Z}'_{rs}}. \quad (4.90)$$

За рівняннями (4.86), (4.89), (4.90) будується Г-подібна схема заміщення асинхронної машини (рис. 4.18, 4.19).

Г-подібна схема заміщення має дві вітки:

1) вітку намагнічування з опорами R_s , $X_{\sigma s}$, R_m , X_m , по яких протікає струм ідеального неробочого ходу $\underline{I}_{soo}$;

2) робочу вітку з опорами $\underline{c} \cdot R_s$, $\underline{c} \cdot X_{\sigma s}$, $\underline{c}^2 \cdot R'_r$, $\underline{c}^2 \cdot X'_{\sigma r}$, $\underline{c}^2 \cdot R'_r \cdot \frac{1-s}{s}$, по яких протікає струм зведеної обмотки ротора $(-\underline{I}''_r)$.

Різниця між струмами реального неробочого ходу $\underline{I}_{so}$ та ідеального неробочого ходу $\underline{I}_{soo}$, які протікають по вітках намагнічування Г-подібної та Г-подібної схем заміщення, відповідно, обумовлює різницю між струмами $\underline{I}'_r$ і $\underline{I}''_r$. Але різниця між струмами дуже мала.

Через те що активні опори R_s і R_m набагато менші за індуктивні опори $X_{\sigma s}$ і X_m , коефіцієнт c можна виражати через індуктивні опори:

$$\underline{c} = 1 + \frac{\underline{Z}_s}{\underline{Z}_m} \approx 1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}. \quad (4.91)$$

Для асинхронних машин величина опору $X_m \approx (20-50) X_{\sigma s}$. Тому коефіцієнт $c = 1,02-1,05$. На практиці для інженерних розрахунків іноді приймають $c = 1$.

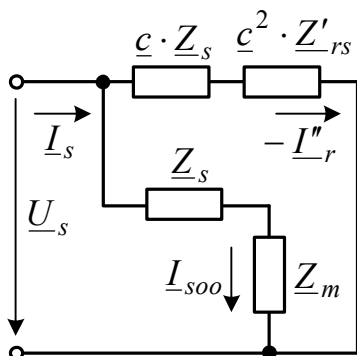


Рисунок 4.18 – Згорнута Г-подібна схема заміщення асинхронної машини

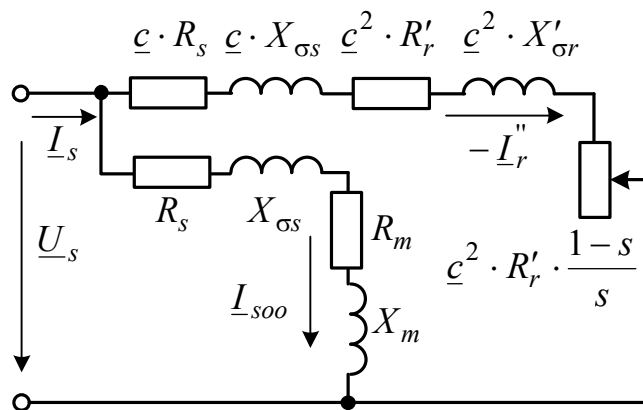


Рисунок 4.19 – Розгорнута Г-подібна схема заміщення асинхронної машини

Отже, співвідношення $Q_s = Q_r$ категорично неприпустиме. Практикою проектування встановлені рекомендовані співвідношення між кількостями пазів статора Q_s та ротора Q_r , які наводяться в посібниках з проектування асинхронних машин.

4.16. Робочі характеристики асинхронних двигунів

Робочими характеристиками асинхронного двигуна є залежності ковзання s , частоти обертання n , обертового моменту на валу M , струму статора I_s , коефіцієнта потужності $\cos \varphi_s$, вхідної потужності P_{in} , ККД η від вихідної потужності P при незмінних і номінальних вхідній напрузі U_{sN} та частоті живильної мережі f_{sN} . Робочі характеристики показують як змінюються експлуатаційні величини двигуна при збільшенні навантаження від неробочого ходу ($P = 0$) до номінального режиму $P = P_N$

(рис. 4.30).

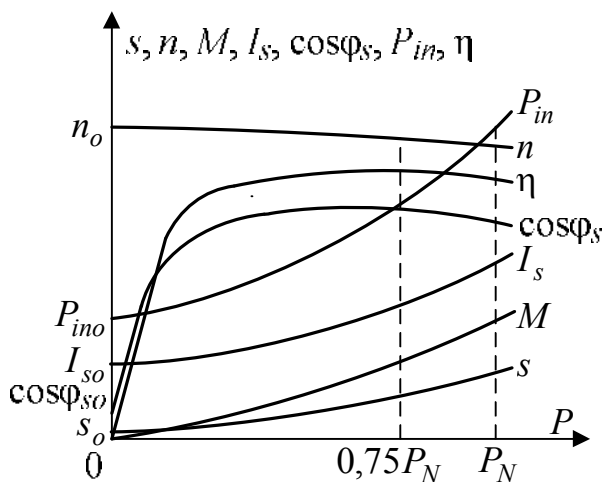


Рисунок 4.30 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

1. Залежності $s(P)$ і $n(P)$ пов'язані одна з одною через (4.1).

Для асинхронних двигунів загальнопромислового призначення номінальне ковзання $s_N = 0,005–0,05$ (більші значення ковзання відповідають двигунам меншої потужності).

При неробочому ході ковзання s_0 відмінно від нуля, але значно менше за ковзання s_N . Зі

збільшенням навантаження, тобто потужності P , ковзання зростає, тому частота обертання n буде спадати, але з урахуванням величини s_N цей спад буде незначним, тому залежність $n(P)$ є жорсткою.

2. Залежність $M(P)$ визначається за (4.108). Зважаючи на пряму пропорційність між кутовою частотою Ω та частотою обертання n , а також на незначний спад частоти обертання n , характеристика $M(P)$ є майже лінійною.

При збільшенні навантаження на валу при незмінних напрузі U_s та

мережі. Асинхронні генератори порівняно з синхронними мають дуже велику потужність збудження: 20–40 % проти 1 % від номінальної потужності. Це означає, що якби на електростанції встановити три асинхронні генератори однакової потужності зі струмом $I_{so} = 30 \% I_{sN}$, то для збудження цих генераторів необхідний один синхронний генератор, який буде постачати реактивну потужність асинхронним генераторам. При цьому потужність синхронного генератора буде дорівнювати потужності одного асинхронного генератора.

Через такий недолік асинхронні генератори при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності майже не застосовуються. Але сьогодні поширюється застосування асинхронних генераторів в вітроенергетиці та мікрогідроенергетиці в поєднанні з напівпровідниковими перетворювачами частоти та напруги, які забезпечують і напруги та частоти

Асинхронні двигуни у складі електроприводів вантажопідіймальних механізмів можуть під час роботи потрапляти до генераторного режиму. Тоді вони є асинхронними генераторами, які працюють паралельно з мережею. У цьому випадку генераторний режим є допоміжним.

Контрольні запитання

1. Де застосовуються асинхронні машини?
2. Що зазначається на таблиці номінальних даних асинхронної машини?
3. В чому полягає принцип дії асинхронного двигуна?
4. В яких межах змінюється ковзання та частота обертання асинхронної машини залежно від режиму роботи?
5. З яких частин складається асинхронна машина?
6. Для чого застосовується зведення обмотки ротора до обмотки статора асинхронної машини?
7. Які умови зведення обмотки ротора до обмотки статора в асинхронній машині?
8. З якою частотою обертаються МРС обмоток статора і ротора при нерухомому та обертовому роторі?
9. Як визначається струм неробочого ходу асинхронної машини?
10. Наведіть системи рівнянь напруг для фазних обмоток статора і ротора, схеми зміщення та векторні діаграми при нерухомому та обертовому роторі.

-
11. Де використовуються індукційний та фазовий регулятори?
 12. Яким за величиною повинно бути ковзання асинхронного двигуна для отримання якнайбільшого ККД в номінальному режимі?
 13. Які втрати потужності існують в асинхронній машині?
 14. Як визначається ККД асинхронних двигуна та генератора?
 15. Охарактеризуйте елементи Т- та Г-подібних схем заміщення асинхронної машини?
 16. Наведіть загальну формулу електромагнітного моменту електричної машини змінного струму.
 17. Які характерні точки мають механічна (внутрішня) та механічна характеристики асинхронної машини?
 18. Які величини визначають максимальний, пусковий моменти та критичне ковзання?
 19. Коли виникають асинхронні та синхронні електромагнітні моменти від вищих гармонік МРС?
 20. Поясніть робочі характеристики асинхронного двигуна.
 21. Порівняйте способи пуску асинхронних двигунів.
 22. Для чого застосовуються глибокопазні двигуни та двигуни з подвійною кліткою?
 23. Порівняйте способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.
 24. Що впливає на величину критичного ковзання та максимального моменту асинхронного двигуна?
 25. Коли застосовуються закони частотного регулювання асинхронних двигунів?
 26. Як здійснюється пуск однофазних асинхронних двигунів?
 27. Як отримується механічна характеристика однофазного асинхронного двигуна?
 28. Які особливості конструкції та характеристик має конденсаторний асинхронний двигун?
 29. В яких випадках застосовуються гальмові режими асинхронних двигунів?
 30. Наведіть рівняння МРС, струмів та напруг асинхронного генератора.
 31. Як відбувається самозбудження асинхронного генератора?
 32. Наведіть зовнішню характеристику асинхронного генератора при автономному навантаженні.

5. СИНХРОННІ МАШИНИ

5.1. Загальні відомості

З усіх електричних машин найбільшою та найменшою є саме синхронна машина. Найбільшою електричною машиною є генератор теплової електростанції потужністю 1,75 ГВт, а найменшою – двигун кулера комп'ютера потужністю 4 Вт. Такий діапазон потужностей та широке застосування привело до появи низки окремих типів синхронних машин: турбогенераторів, гідрогенераторів, дизель-генераторів, синхронні двигунів, синхронних компенсаторів, крокових двигунів, гістерезисних двигунів, двигунів з постійними магнітами, реактивних синхронних двигунів. Через конструктивні особливості синхронні машини можуть мати як горизонтальне, так і вертикальне розташування вала.

Приблизно 90 % усієї світової електроенергії виробляється за допомогою синхронних генераторів. Синхронні генератори, що працюють на теплових та атомних електростанціях, називаються турбогенераторами, на гідравлічних – гідрогенераторами. На вітряних, припливних електростанціях застосовуються синхронні генератори з постійними магнітами. Також синхронні генератори є джерелом електричної енергії на пересувних електростанціях і транспортних установках (кораблях, тепловозах, літаках, автомобілях та ін.).

У двадцятому сторіччі синхронні двигуни були поширені порівняно мало. Синхронні двигуни використовувались для приводу потужних насосів, вентиляторів, компресорів та інших установок, де потрібна постійна частота обертання.

В двадцять першому сторіччі розповсюдженню синхронних двигунів посприяло поширення постійних магнітів, що дозволило отримати магнітне поле збудження без застосування обмотки.

У синхронних двигунів з обмоткою збудження є унікальна властивість – генерувати реактивну потужність в електричних установках для підвищення енергетичних показників джерел і приймачів електричної енергії, наприклад, для підвищення коефіцієнта потужності мережі. Для цього ж використовують синхронні компенсатори, які встановлюються на підстанціях електричних мереж.

5.4.5. Приклади застосування синхронних машин

Турбогенератори (рис. 5.12) приводяться в обертання швидкохідними паровими турбінами. Діапазон потужностей турбогенераторів є дуже широким: від 5000 до 1750000 кВ·А. Сучасні турбогенератори виконані дво- або чотириполюсними.

Ротори турбогенераторів виконуються неявнополюсними з горизонтальним розташуванням вала.

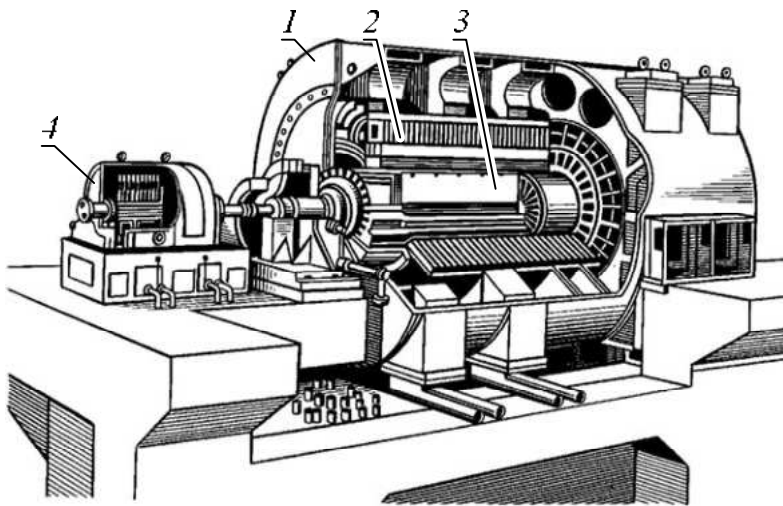


Рисунок 5.12 – Турбогенератор у розрізі:
1 – корпус; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – збуджувач

Максимальними розмірами ротора є діаметр 1,2 м, довжина осердя – до 6,5 м. Саме в турбогенераторах застосовуються складні системи охолодження воднем, водою або повітрям.

Гідрогенератори (рис. 5.13) приводяться

до обертання тихохідними водяними турбінами з частотою обертання декілька десятків або сотень обертів за хвилину, наприклад, 48-ми полюсний генератор має частоту обертання 125 об/хв при частоті 50 Гц. Через тихохідність гідрогенераторів вони виконуються явнополюсними.

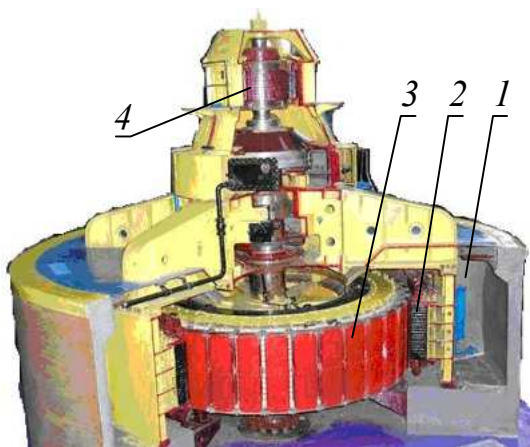


Рисунок 5.13 – Макет вертикального гідрогенератора:
1 – корпус; 2 – статор; 3 – ротор;
4 – збуджувач

Найбільша потужність гідрогенератора в світі становить 760000 кВ·А. Гідрогенератори не мають габаритних обмежень, їх розміри сягають – внутрішній діаметр осердя статора 16 м, висота пакета статора 2 м. Розташування вала може бути вертикальним. Вал може закріплюватися за допомогою верхнього або нижнього підшипників.

Для гідрогенераторів середньої потужності можливо капсульне виконання. Для цього гідрогенератор із

Зменшення опору X_{ad} при зростанні МРС F_E зумовлено саме насиченням магнітної системи синхронної машини по поздовжній осі.

5.15. Енергетична діаграма та ККД синхронної машини

Енергетичні діаграми синхронних машин (рис. 5.43) будуються за загальними правилами (див. підрозд. 2.17 та 4.6).

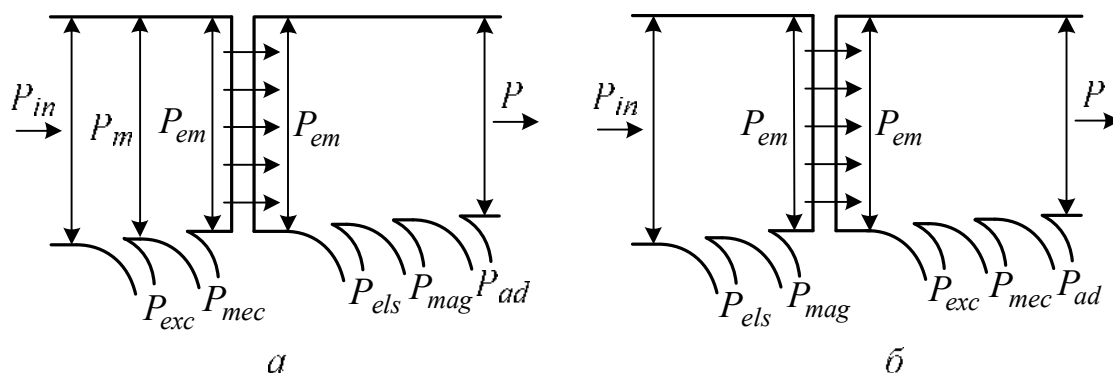


Рисунок 5.43 – Енергетичні діаграми активної потужності синхронного генератора (а) та синхронного двигуна (б)

Електричні втрати в обмотці статора P_{els} визначаються за (4.40). Магнітні втрати P_{mags} визначаються за окремими ділянками осердя статора (зубці та спинка) синхронної машини, як і в (2.36). Для синхронних машин середньої та великої потужностей сума електричних втрат в обмотці статора P_{els} та магнітних втрат P_{mag} дуже мала порівняно з вихідною потужністю P – електричною потужністю, що віддається до мережі в режимі генератора, або механічною потужністю, що знімається з вала в режимі двигуна. Додаткові втрати P_{ad} згідно зі стандартами не повинні перебільшувати 0,5 % від вхідної потужності (4.44).

Зважаючи на малість суми втрат, у синхронних машинах приймається, що

$$P_{em} = P = m_s \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi. \quad (5.98)$$

В усталеному режимі магнітні втрати в осерді ротора відсутні через те, що по осердю ротора проходить постійний магнітний потік збудження.

Якщо збудження відбувається за рахунок підведеної потужності до синхронної машини (наприклад, самозбудження), то втрати на збуджен-

же, за величиною та знаком змінюється реактивна потужність машини.

При збільшенні активної потужності (рис. 5.59) зростає струм I_s , зростають спади напруг $I_s X_{cs}$ і $I_s R_s$. Для забезпечення умови (5.124) необхідно збільшувати струм I_E . Тому нижня точка U -подібних характеристик зміщується праворуч по осі I_E , тобто в бік більших струмів.

У точці A струм $I_E = 0$, ЕРС $E_o = 0$. Напруга явнополюсного за (5.73) та неявнополюсного за (5.75) генераторів становитиме відповідно:

$$\underline{U}_s = 0 - j \underline{I}_d X_d; \quad (5.126)$$

$$\underline{U}_s = 0 - j \underline{I}_s X_s. \quad (5.127)$$

З (5.126), (5.127) отримуються вирази струмів обмотки статора явнополюсного та неявнополюсного генераторів у точці A відповідно:

$$I_{sA} = \frac{U_s}{X_d}; \quad (5.128)$$

$$I_{sA} = \frac{U_s}{X_s}. \quad (5.129)$$

Кривою a обмежується стійка робота синхронного генератора. Пряма c обмежує можливі режими за умовами насичення магнітної системи через зростання струму I_E та нагрівання обмотки збудження через зростання втрат на збудження.

Таким чином, регулювання реактивної потужності синхронного генератора здійснюється змінюванням струму збудження.

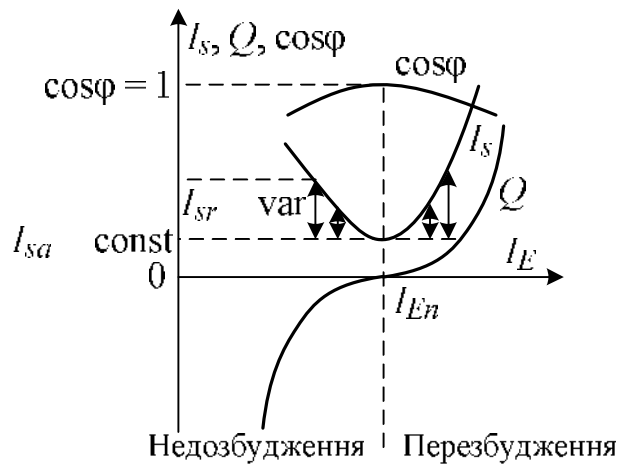


Рисунок 5.58 – U -подібна характеристика та залежності $Q(I_E)$, $\cos\varphi(I_E)$ синхронного генератора

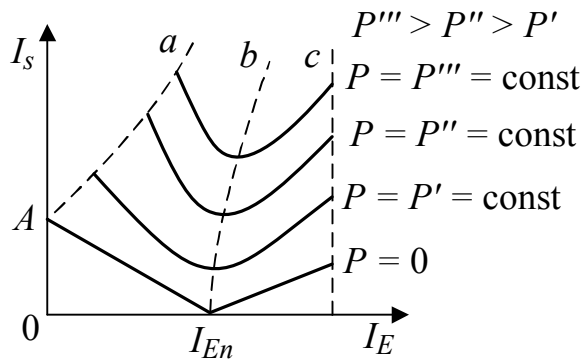


Рисунок 5.59 – Сімейство U -подібних характеристик

за фазну напругу мережі, $E_o > U_\phi$. Синхронний компенсатор потрапляє до режиму перезбудження та віддає до мережі реактивний ємнісний струм. За наявності в мережі ємнісного струму напруга на всіх затискачах трансформаторів зростає.

Якщо напруга мережі зростає, $U_\phi > U_{\phi N}$, то ЕРС E_o стає меншою за фазну напругу мережі, $E_o < U_\phi$. Синхронний компенсатор потрапляє до режиму недозбудження та віддає до мережі реактивний індуктивний струм. За наявності в мережі індуктивного струму напруга на всіх затискачах трансформаторів спадає.

Якщо потужність синхронного компенсатора приблизно дорівнює потужності мережі, до якої підключено синхронний компенсатор, то за допомогою синхронного компенсатора можна підтримувати постійність напруги мережі у межах $\pm 1\%$.

Контрольні запитання

1. Де застосовуються синхронні машини?
2. Які величини наводяться на таблиці паспортних даних синхронної машини?
3. В чому полягає принципи дії синхронної машини?
4. Від чого залежить частота обертання синхронної машини?
5. Порівняйте конструкції явнополюсної та неявнополюсної синхронних машин.
6. Які системи охолодження застосовуються в синхронних машинах?
7. Які системи збудження застосовуються в синхронних машинах?
8. Як проходять поздовжня та поперечна осі в синхронній машині?
9. Які особливості конструкції неявнополюсної та явнополюсної синхронних машин наближають розподіл магнітної індукції магнітного поля збудження в повітряному проміжку до синусоїдного?
10. Що враховують коефіцієнти магнітного поля збудження, магнітного потоку збудження, насичення?
11. Що називається реакцією якоря електричної машини?
12. Від яких чинників залежить реакція якоря синхронної машини?
13. Як визначається реакція якоря в явнополюсній та неявнополюсній синхронних машинах?

-
14. В чому полягає теорія двох реакцій?
 15. Для чого застосовується зведення обмотки статора до обмотки збудження в синхронних машинах?
 16. Які індуктивні опори розрізняють в синхронних машинах?
 17. Наведіть схеми заміщення обмотки статора явнополюсної та неявнополюсної синхронних машин в усталеному режимі.
 18. Наведіть порядок побудови векторних діаграм синхронного генератора без урахування насичення.
 19. Наведіть порядок побудови векторних діаграм синхронного генератора з урахування насичення.
 20. Наведіть порядок побудови перетвореної векторної діаграми явнополюсного та неявнополюсного синхронного генератора.
 21. Як враховується насичення магнітної системи синхронної машини при побудові векторних діаграм?
 22. Яка векторна діаграма синхронної машини називається векторною діаграмою Потьє?
 23. Яка векторна діаграма синхронної машини називається векторною діаграмою Блонделя?
 24. Який фізичний зміст має кут навантаження синхронної машини?
 25. З якою метою застосовується система відносних одиниць в синхронних машинах?
 26. Як визначити індуктивні опори по поздовжній та поперечній осях та індуктивний опір розсіяння обмотки статора синхронної машини за допомогою характеристик неробочого ходу та короткого замикання?
 27. Як визначається відношення короткого замикання синхронної машини?
 28. Як впливає величина відношення короткого замикання синхронної машини на її характеристики?
 29. Які втрати потужності існують в синхронній машині?
 30. Які характеристики визначають роботу синхронного генератора при автономному навантаженні?
 31. Як впливає на зовнішню характеристику синхронного генератора характер навантаження?
 32. Як впливає на регулювальну характеристику синхронного генератора характер навантаження?
 33. Як отримати індукційну навантажувальну характеристику екс-

периментальним та розрахунковим шляхами?

34. Для чого застосовується характеристичний трикутник (трикутник Потьє)?

35. Які умови необхідно виконати при підключенні синхронного генератора на паралельну роботу з мережею нескінченної потужності?

36. Поясніть порядок дій при синхронізації та самосинхронізації синхронного генератора при підключенні на паралельну роботу з мережею нескінченної потужності.

37. Які умови підключення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею нескінченної потужності перевіряються за допомогою синхроскопа?

38. Які характеристики визначають роботу синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності?

39. Як регулюються активна та реактивна потужності синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності?

40. Порівняйте електромагнітні моменти явнополусної та неявнополусної синхронних машин.

41. Чим обмежується робота синхронного генератора при регулюванні реактивної потужності?

42. Дайте визначення статичній та динамічній стійкості синхронної машини?

43. Як визначаються коефіцієнти статичної та динамічної стійкості синхронної машини?

44. В чому полягає метод площ при визначенні динамічної стійкості синхронної машини?

45. В яких режимах може працювати синхронний двигун?

46. Коли виникають режими кутової, регулювальної, U -подібної характеристик синхронного двигуна?

47. Як відбувається пуск синхронного двигуна?

48. Які існують способи пуску синхронних двигунів?

49. Поясніть робочі характеристики синхронного двигуна?

50. Чому частота обертання синхронного двигуна не залежить від навантаження?

51. Для чого застосовуються синхронні компенсатори?

6. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

6.1. Загальні відомості

Машини постійного струму використовуються насамперед як двигуни. Генератори використовуються в автономних системах (системи автономного енергопостачання), а також як електромашинні посилювачі і тахогенератори (прилади для перетворювання частоти обертання в пропорційний електричний сигнал).

Двигуни постійного струму застосовуються в електроприводах, які потребують плавного регулювання частоти обертання в широких межах (відношення максимальної частоти обертання до номінальної може становити 10:1, відношення номінальної частоти обертання до мінімальної може становити 100:1). Тільки двигуни постійного струму дозволяють просто й економно регулювати частоту обертання в таких широких межах. Двигуни постійного струму використовуються в електротранспорті, в морському транспорті, в приводі прокатних станів, в електротрансмісії великовантажних автомобілів, у вантажопідйомних та землерийних машинах, складних металообробних верстатах. Також двигуни постійного струму використовуються в тих установках, де джерелом електричної енергії є акумуляторні батареї (стартерні двигуни, двигуни підводних човнів та ін.).

Генератори постійного струму застосовуються як основні джерела живлення на транспортних установках для заряджання акумуляторних батарей.

У системах автоматичного регулювання машини постійного струму застосовуються як різноманітні виконавчі двигуни.

6.2. Паспортні дані машин постійного струму

Кожна машина постійного струму обладнується табличкою номінальних даних, на якій зазначаються:

1) номінальна потужність P_N у кіловатах (кВт): для двигунів – механічна потужність на валу двигуна, для генераторів – електрична потужність на затискачах обмотки якоря;

2) номінальна напруга U_N у вольтах (В) – напруга на затискачах обмотки якоря;

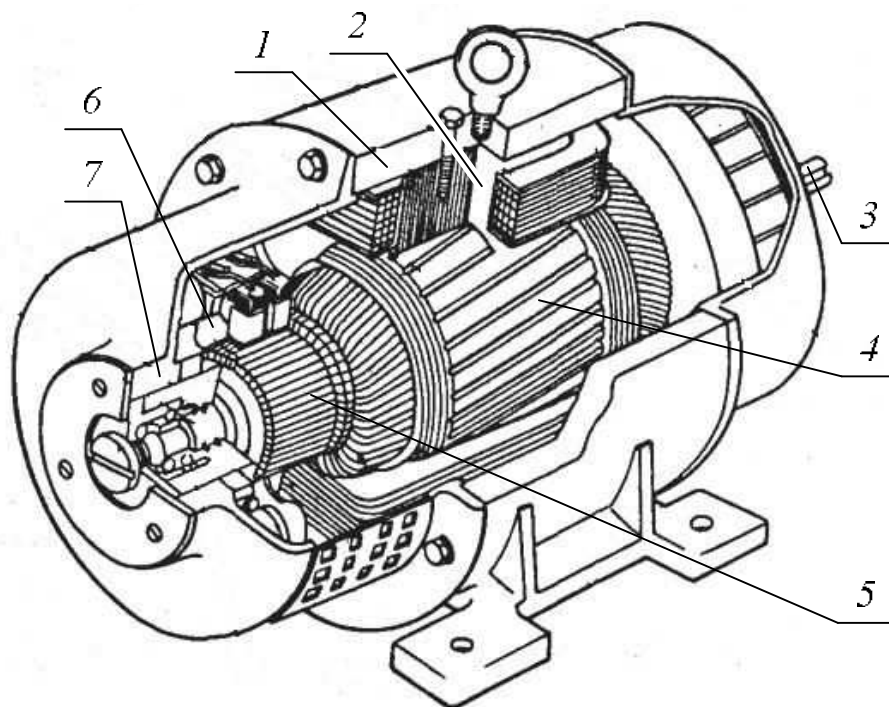


Рисунок 6.5 – Конструкція машини постійного струму

ряний проміжок асинхронних машин).

Нерухома частина складається зі станини 1, до якої кріпляться головні 2 та додаткові (на рис. 6.5 не показані) полюси, що складаються з осердь та котушок. Котушки головних полюсів з'єднуються послідовно та утворюють обмотку збудження.

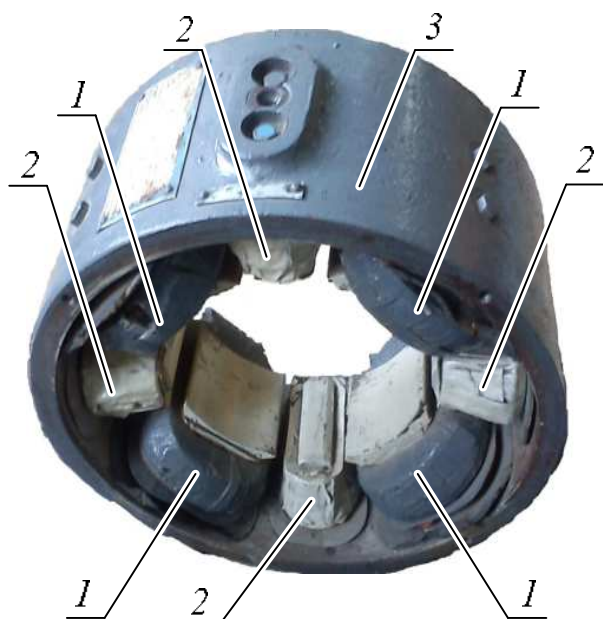


Рисунок 6.6 – Магнітна система чотириполюсної машини постійного струму

Якір складається з вала 3, осердя якоря з обмоткою 4, колектора 5. Щітки в щіткотримачах розташовуються на траверсі, що все разом утворює щітковий пристрій 6. Кінці вала закріплюються у підшипниках, які зовнішніми обоймами закріплюються в підшипникових щитах 7. На валу може встановлюватися вентилятор самовентиляції.

Нерухома частина машини постійного струму ще називається магнітною системою (рис. 6.6). Головні полюси 1 складаються з осердь та полюс-

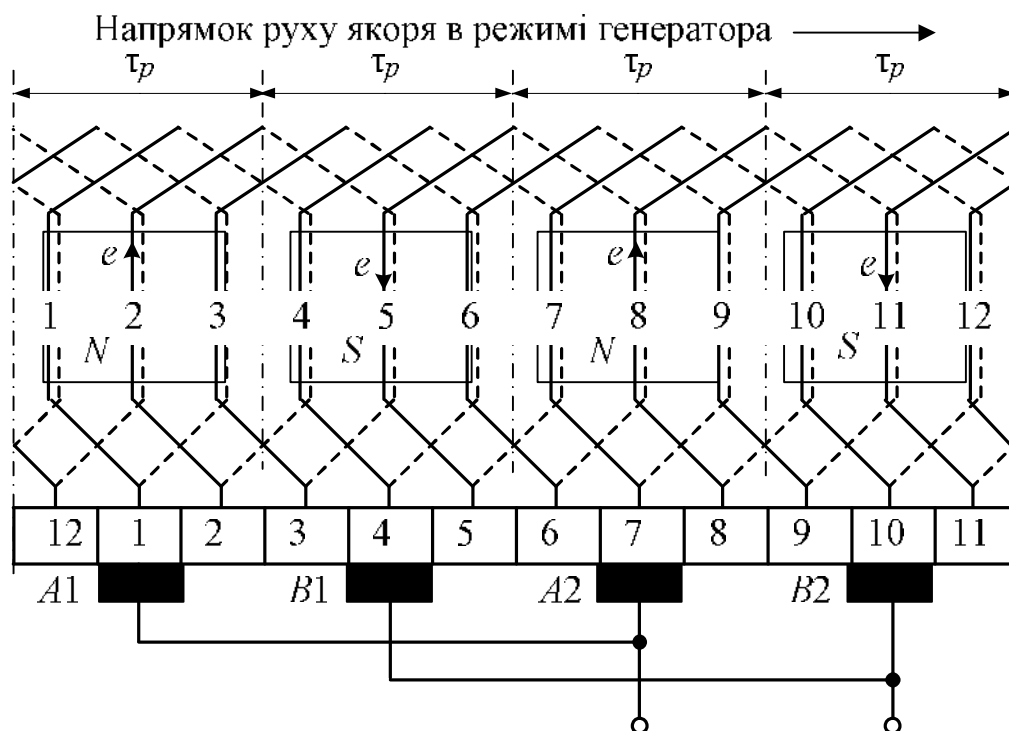


Рисунок 6.12 – Схема-розгортка простої петльової обмотки якоря на 12 пазів чотириполусної машини постійного струму

На схемі-розгортці (рис. 6.12) головні полюси знаходяться над обмоткою, а обмотка переміщується відносно нерухомих полюсів зліва направо.

Порядок побудови схеми-розгортки обмотки якоря машини постійного струму

1. Зображаються елементарні пази, в кожному пазу два провідники: верхній зображається суцільною лінією, нижній – пунктирною. Пази нумеруються.

2. Креслиться смуга, яка зображує колектор, та розбивається на колекторні пластини. Розбивка смуги на колекторні пластини відповідає серединам міжпазових проміжків.

3. Проводиться розбивка пазів із провідниками на полюсні кроки τ_p . Кількість полюсних кроків дорівнює кількості полюсів $2p$. На кожному полюсному кроці зображуються прямокутники шириною $(0,6-0,7)\tau_p$, що позначають головні полюси. Задається полярність полюсів.

4. Провідники нижнього та верхнього шарів з'єднуються відповідно до розрахованих кроків обмотки. Починають із верхнього шару першого паза. Там знаходиться ліва сторона першої секції. Права активна сторона першої секції відповідно з кроком y_1 розташована у нижньому шарі чет-

ра щітка набігає на колекторну пластину 1 та збігає з пластини 2. Секція ab знаходиться в стані короткого замикання.

Площа контакту S_{b1} при обертанні колектора буде зростати. Опір R_{b1} буде зменшуватись. Струм пластини 1 збільшуватиметься. Площа контакту S_{b2} при обертанні колектора буде меншати, опір R_{b2} – зростати, струм пластини 2 – зменшуватися.

Отже, в процесі комутації має місце безперервний перерозподіл струму між колекторними пластинами 1 та 2.

На останньому етапі комутації щітка цілком розташована на пластині 1. Секція ab входить до складу південної паралельної вітки.

Струм у ній дорівнює струмові південної паралельної вітки та спрямований від точки b до точки a . Струм колекторної пластини 1 складається з двох струмів i_a , $i_1 = 2i_a$. Струм колекторної пластини 2 i_2 дорівнює нулю.

Межі зміни струмів: пластина 1 – від 0 до $2i_a$; пластина 2 – від $2i_a$ до 0; секція ab – від $+i_a$ через 0 до $-i_a$.

Сумарна ЕРС комутуючої секції дорівнює нулю згідно з припущеннями. Отже, змінювання струму в комутуючій секції ab за величиною та знаком обумовлено тільки змінюванням величин опорів R_{b1} та R_{b2} . Тому класична теорія комутації називається «комутацією опором».

Змінювання знака струму комутуючої секції по суті є зміною на-

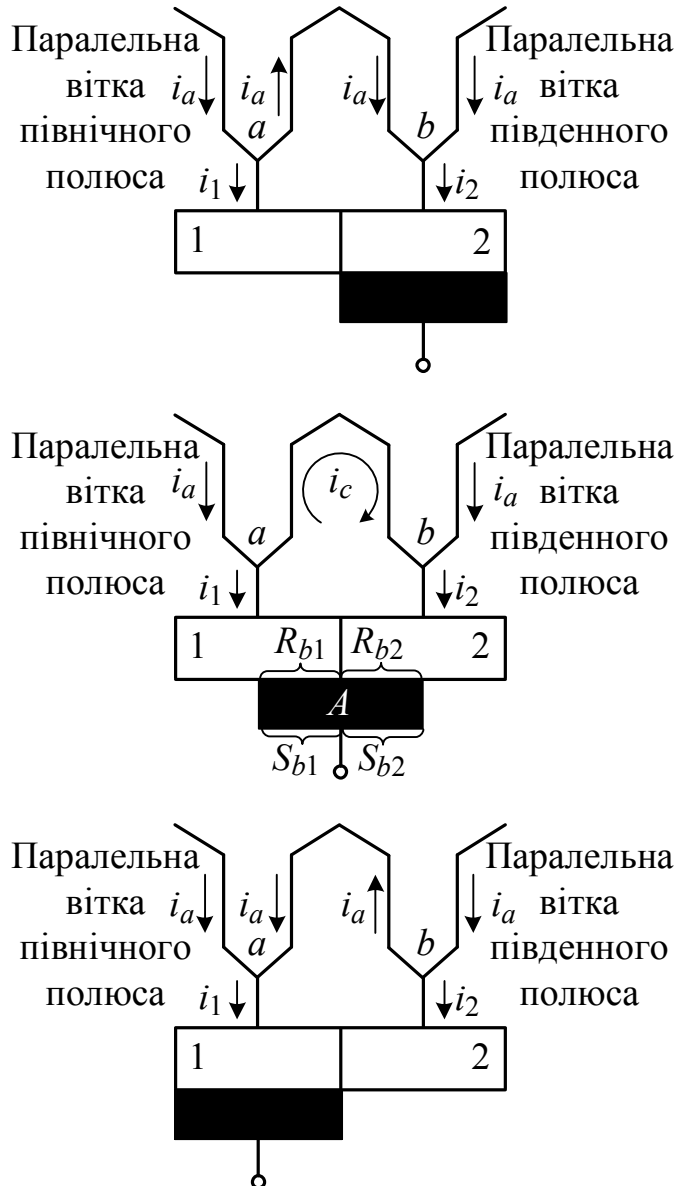


Рисунок 6.36 – Процес комутації секції обмотки якоря в розвитку

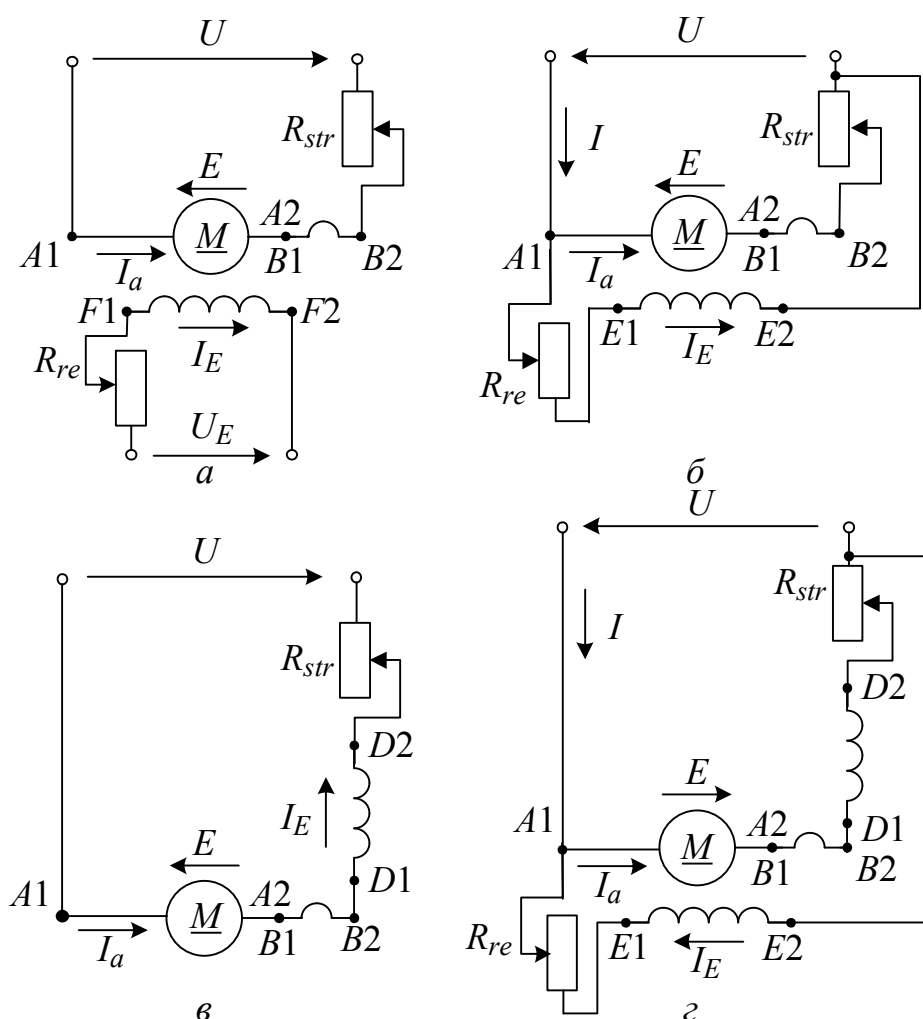


Рисунок 6.54 – Електричні схеми двигунів постійного струму:
 а – незалежного збудження; б – паралельного збудження;
 в – послідовного збудження; г – змішаного збудження

ки якоря $I_a \Sigma R_a$ та на щітковому контакті на парі щіток $2\Delta U_b$.

Рівняння рівноваги напруги обмотки якоря:

$$U - E = I_a \Sigma R_a + 2\Delta U_b. \quad (6.119)$$

Прикладена до обмотки якоря напруга врівноважується наведеною в обмотці якоря ЕРС E і спадом напруги на опорах кола обмотки якоря $I_a \Sigma R_a$ та на щіткових контактах $2\Delta U_b$ (6.107):

$$U = E + I_a \Sigma R_a + I_a R_b = E + I_a (\Sigma R_a + R_b). \quad (6.120)$$

Остаточно рівняння рівноваги напруги обмотки кола якоря

$$U = E + I_a R_a. \quad (6.121)$$

Струм обмотки якоря I_a зумовлюється сумісною дією напруги U та

Величина ККД у номінальному режимі залежить від номінальної потужності машини постійного струму. Для машин малої потужності ККД становить 0,6–0,75, для машин середньої та великої потужності – 0,8–0,94.

6.12.7. Робочі характеристики двигунів послідовного збудження

Робочими характеристиками двигуна постійного струму послідовного збудження є залежності частоти обертання n , моменту на валу M , струму обмотки якоря I_a , ККД η від корисної потужності P при незмінній номінальній напрузі $U_N = \text{const}$ (рис. 6.62).

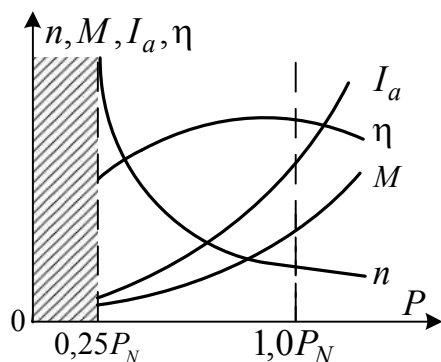


Рисунок 6.62 – Робочі характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження

1. Залежність $n(P)$ подібна до електромеханічної характеристики. Являє собою сполучення гіперболи з плавним переходом до прямої лінії.

2. Залежність $M(P)$. Наскільки істотно та нелінійно змінюється частота обертання n , настільки істотно та нелінійно буде змінюватися момент M . Залежність подібна до моментної характеристики та є сполученням параболи і прямої лінії.

3. Залежність $I_a(P)$. У ненасиченому режимі струм I_a прямо пропорційний $\sqrt{M}$, у насиченому режимі – M . У ненасиченому режимі струм I_a зростає повільніше, ніж момент M . У насиченому режимі інтенсивність зростання моменту M та струму I_a приблизно однакова.

4. Залежність $\eta(P)$ така сама, як і в усіх електричних машинах.

Як і для двигуна паралельного збудження, максимум ККД настає при однаковості постійних та змінних втрат потужності. До змінних втрат двигуна постійного струму послідовного збудження належать електричні втрати обмотки якоря P_{ela} , електричні втрати обмотки збудження P_E , електричні втрати в щітковому контакті P_{elb} , додаткові втрати P_{ad} . Постійними втратами двигуна постійного струму послідовного збудження є сума магнітних P_{mag} і механічних втрат P_{mec} у номінальному режи-

$$I_{E2} = I_{a2} \frac{R_{shE}}{R_{shE} + R_E}. \quad (6.153)$$

Струм збудження спаде, $I_{E2} < I_{E1}$, магнітний потік Φ_δ зменшиться, для збереження величини моменту M_{em} струм I_a повинен зрости відповідно до (6.49) (рис. 6.77).

Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження є економічним, простим способом, який набув широкого застосування на електротранспорті.

Секціонування обмотки збудження

Для здійснення цього способу регулювання при виготовленні двигуна обмотка збудження виконується з низкою відпайок, які виводяться на перемикач. Перемикаючи (зменшуючи) кількість витків обмотки збудження, магнітний потік зменшується, що призведе до зростання частоти обертання за аналогією з шунтуванням обмотки збудження.

Шунтування обмотки якоря

На початку регулювання частоти обертання двигун працює з частотою обертання n_1 , зі струмом обмотки якоря I_{a1} , магнітним потоком Φ_1 , ЕРС E_1 , з моментом $M_{em} = M_{stat}$.

До початку регулювання частоти обертання вимикачі $Q2$ і $Q3$ розімкнено, струми обмоток якоря та збудження дорівнюють один одному, $I_{a1} = I_{E1}$ (див. рис. 6.75).

У перший момент часу після замикання вимикача $Q2$ потокозчеплення обмотки збудження залишається постійним, отже, магнітний потік не змінюється. Струм I_a зменшується за рахунок відгалуження час-

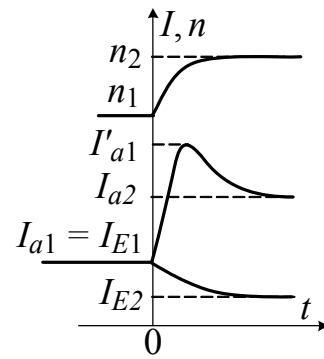


Рисунок 6.76 – Зміна струму обмотки якоря та частоти обертання двигуна постійного струму послідовного збудження при шунтуванні обмотки збудження

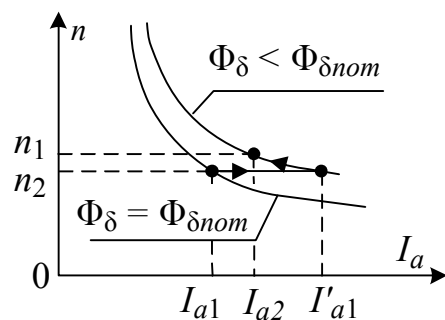


Рисунок 6.77 – Електромеханічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження при регулюванні частоти обертання шунтуванням обмотки збудження

на, але з протилежним напрямком обертання.

Режим повзучої частоти обертання

Цей спосіб гальмування використовується у вантажопідіймальних механізмах при опусканні вантажу з дуже малою швидкістю.

Вихідний режим – точка A природної механічної характеристики (рис. 6.86). До кола обмотки якоря вмикається реостат із великим баластним опором R_{bal} . Нахил характеристики різко зростає. Двигун переходить із вихідного режиму, точки A , через точку B до кінцевого режиму – точки D . Після вмикання опору R_{bal} струм I_a зменшується, електромагнітний момент двигуна стає меншим за статичний, $M_{em} < M_{stat}$, частота обертання спадає до нуля – двигун повертається в точку C . Після точки C під дією надлишкового гальмівного моменту M_{stat} напрямок обертання змінюється, змінюється знак ЕРС E , струм I_a і момент M_{em} зростають. Зростання частоти обертання n , струму I_a та моменту M_{em} продовжується доти, доки не настане рівновага моментів на валу.

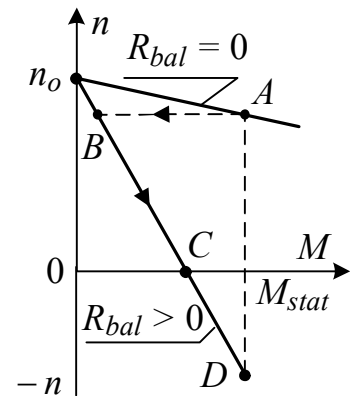


Рисунок 6.86 –
Механічна
характеристики
двигуна постійного
струму паралельного
збудження в режимі
повзучої частоти
обертання

При цьому рівновага моментів на валу настає при від'ємних частотах обертання, причому вона може бути як завгодно малою. Все визначається опором R_{bal} . В цьому режимі знак моменту не змінюється, а змінюється напрямок обертання.

Контрольні запитання

1. Де застосовуються машини постійного струму?
2. Які величини наводяться на таблиці паспортних даних машини постійного струму?
3. В чому полягає принципи дії машини постійного струму?
4. З яких елементів складається машина постійного струму?
5. Для чого призначається колектор в машині постійного струму?
6. Які параметри характеризують обмотку якоря машини постій-

ного струму?

7. Які типи обмоток якоря застосовуються в машинах постійного струму?

8. Як будується схема-розгортка обмотки якоря машини постійного струму?

9. Для чого застосовуються зрівняльні з'єднання машини постійного струму?

10. Яка обмотка якоря машини постійного струму не потребує зрівняльних з'єднань?

11. Як визначаються ЕРС обмотки якоря та електромагнітний момент машини постійного струму?

12. Як визначається реакція якоря в машині постійного струму?

13. Які засоби боротьби з реакцією якоря застосовуються в машині постійного струму?

14. Які причини іскріння машини постійного струму?

15. Дайте визначення комутації машини постійного струму.

16. Які рівняння характеризують процес комутації машини постійного струму.

17. Як розраховується ЕРС комутуючої секції?

18. Які засоби поліпшення комутації застосовуються в машинах постійного струму?

19. Які втрати потужності існують в машині постійного струму?

20. Наведіть основні рівняння генераторів і двигунів постійного струму.

21. Порівняйте характеристики генераторів постійного струму різних типів збудження.

22. Як відбувається процес самозбудження генераторів постійного струму?

23. Як визначається стійкість роботи двигунів постійного струму?

24. Порівняйте характеристики двигунів постійного струму різних типів збудження.

25. Які способи пуску застосовуються для двигунів постійного струму?

26. Які способи регулювання частоти обертання застосовуються для двигунів постійного струму?

27. Які способи гальмування застосовуються для двигунів постійного струму?

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК
Асинхронний генератор зі

самозбудженням 242

– двигун з подвійною кліткою 218

– – глибокопазний 217

– – конденсаторний 237

– – однофазний 230

Базисні величини синхронної

машини 283

Векторна діаграма

асинхронного двигуна 193

– – – – при нерухомому роторі 177

– – – генератора 241

– – Блонделя 279

– – Потьє 289

– – синхронної машини з
урахуванням насичення

290, 292

– – – –перетворена 282, 283

– – трансформатора в режимі
короткого замикання 58

– – – –навантаження 50

– – – – – спрощена 64

– – – – – неробочого ходу 41

– – триобмоткового
трансформатора 88**Втрати**– додаткові асинхронної
машини 181– електричні асинхронної
машини 181

– магнітні асинхронної

машини 181

– механічні асинхронної машини
181– потужності машини постійного
струму 392

– – синхронної машини 294

– – трансформатора 59, 60, 61

Геометрична нейтраль 372, 380

ЕРС фазної обмотки статора

машини змінного струму 126

– обмотки якоря машини
постійного струму 369– обмотки вищої напруги
трансформатора 32– – нижчої напруги
трансформатора 32**Закон електромагнітної індукції 5**Залежність коефіцієнта корисної дії
від навантаження 62

Зубцеві гармоніки ЕРС 123

Індуктивний опір віткинамагнічування трансформатора
40– – короткого замикання
трансформатора 55– – неробочого ходу
трансформатора 52– – машини змінного струму
головний 148, 189– – розсіяння обмотки ротора
асинхронної машини 176– – – фазної обмотки статора
машини змінного струму 152

-
- – синхронної машини по
 поздовжній осі 276
 - – – – по поперечній осі 276
 - – – – Потьє 301
 - – – – синхронний 277
 - – розсіяння первинної
 обмотки трансформатора
 49
 - – – зведеної вторинної
 обмотки трансформатора
 49

 - Клас ізоляції 15
 - Ковзання 168
 - критичне 197
 - номінальне 199
 - Коефіцієнт динамічної
 стійкості 324
 - Картера 156
 - корисної дії асинхронної
 машини 166, 183
 - – – машини постійного
 струму 341, 393
 - – – синхронної машини 248,
 295
 - – – трансформатора 20, 60
 - магнітного потоку
 збудження 264
 - насичення 161
 - обмотковий 122, 123
 - реакції якоря по поздовжній
 осі 274
 - – – по поперечній осі 274
 - форми поля реакції якоря по
 поздовжній осі 270
 - – – – по поперечній осі 270
 - розподілу обмотки 117, 118
 - статичної стійкості 320
 - трансформації 22
 - укорочення кроку обмотки 114, 115
 - форми магнітного поля
 збудження 263
 - Кратність максимального моменту
 201
 - пускового моменту 201
 - Крок обмотки діаметральний 98
 - другий частковий 351, 357, 368
 - перший частковий 351, 357, 368
 - по колектору 351, 357, 368
 - результуючий 351, 356, 357, 368
 - укорочений 99
 - Кут навантаження 280
 - – критичний 308, 311

 - Матеріали активні 13
 - ізоляційні 15
 - конструкційні 13
 - Момент електромагнітний 194, 309,
 370
 - максимальний 198
 - пусковий 198
 - вищих гармонік магнітного поля
 асинхронний 204
 - – – – синхронний 206
 - МРС трифазної обмотки 138, 141
 - фазної обмотки 133, 137

 - Напруга короткого замикання
 трансформатора 56

 - Потужність автотрансформатора
 прохідна 90
 - – розрахункова 89
 - електромагнітна 181, 294, 393

-
- механічна 181
 - номінальна 12

 - Рівняння Максвела 5
 - Фарадея 6

 - Стійкість роботи асинхронних двигунів 201
 - – двигунів постійного струму 410
 - синхронної машини динамічна 322
 - – – статична 317

 - Трикутник короткого замикання трансформатора 58
 - характеристичний генератора постійного струму 400
 - – синхронного генератора (Потьє) 298

 - Формула Клосса 199
 - Піхельмайера 389

 - Характеристика U-подібна 315
 - електромеханічна 412, 415
 - зовнішня трансформатора 66
 - – генератора постійного струму 398, 403, 405, 406
 - – синхронного генератора 295
 - короткого замикання синхронного генератора 286
 - кутова активної потужності 309
 - – реактивної потужності 316
 - магнітна трансформатора 35
 - – електричної машини 160
 - механічна асинхронного двигуна 200
 - – – – з подвійною кліткою 219
 - – (внутрішня) асинхронної машини
 - – – однофазного асинхронного двигуна 198
 - – – – – з фазозсувним елементом 237
 - механічна двигуна постійного струму 413, 416, 420
 - моментна 412, 415
 - навантажувальна генератора постійного струму 399
 - – синхронного генератора 297
 - неробочого ходу генератора постійного струму 397
 - – – синхронного генератора 285
 - регульовальна генератора постійного струму 398
 - – синхронного генератора 297
 - – – двигуна 330
 - швидкісна
 - Характеристики короткого замикання трансформатора 56
 - неробочого ходу трансформатора 53
 - робочі асинхронного двигуна 210
 - – двигуна постійного струму 417, 418
 - – синхронного двигуна 335

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І.Мілих. – Київ : Каравела, 2012. – 688 с.
2. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка / В.І. Мілих. – Київ : "Каравела", 2006. – 376 с.
3. Андрієнко В.М. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К. : НУХТ, 2010. – 366 с.
4. Белікова Л.Я. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одеса : Наука і техніка, 2012. – 478 с.
5. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
6. Електричні машини : підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.
7. Яцун М.А. Електричні машини : навч. посіб. для студ. базового напрямку «Електромеханіка» / М.А. Яцун – 2-ге вид., стер. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.
8. Брускин Д.Э. Электрические машины: в 2 ч. Ч. 1 / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов и др. – М. : Высш. шк., 1990. – 319 с.
9. Брускин Д.Э. Электрические машины: в 2 ч. Ч. 2 / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов и др. – М. : Высш. шк., 1990. – 335 с.
10. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
11. Кацман М.М. Электрические машины : учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений / М.М. Кацман - 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2001. – 463 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	5
1.1. Принципи перетворення енергії в електричних машинах	5
1.2. Закони електромеханіки	9
1.3. Класифікація електричних машин	10
1.4. Номінальні дані електричних машин і трансформаторів	11
1.5. Матеріали, що застосовуються в електричних машинах і трансформаторах	13
Контрольні запитання	16
2. ТРАНСФОРМАТОРИ	17
2.1. Загальні відомості	17
2.2. Класифікація трансформаторів	17
2.3. Паспортні дані трансформатора	19
2.4. Принцип дії трансформатора	20
2.5. Коефіцієнт трансформації	22
2.6. Конструкція трансформаторів	23
2.6.1. Магнітопроводи	23
2.6.2. Обмотки трансформаторів	26
2.6.3. Системи охолодження трансформаторів	27
2.7. Електромагнітні процеси та рівняння напруг трансформатора в режимі неробочого ходу	29
2.8. Магнітний розрахунок трансформаторів	33
2.9. Величина та форма струму неробочого ходу трансформатора	36
2.10. Параметри трансформатора в режимі неробочого ходу	39
2.11. Електромагнітні процеси та рівняння МРС і струмів у трансформаторі в режимі навантаження	41
2.12. Рівняння напруг трансформатора в режимі навантаження	43
2.13. Зведений трансформатор	45
2.14. Схема заміщення трансформатора в режимі навантаження	47

2.15.	Векторна діаграма трансформатора в режимі навантаження	50
2.16.	Визначення параметрів трансформатора за допомогою дослідів неробочого ходу та короткого замикання	51
2.16.1.	Дослід неробочого ходу	51
2.16.2.	Дослід короткого замикання	54
2.17.	Енергетична діаграма трансформатора	58
2.18.	Коефіцієнт корисної дії трансформатора	60
2.19.	Зміна напруги трансформатора в режимі навантаження	63
2.20.	Зовнішня характеристика трансформатора	66
2.21.	Трифазні трансформатори	67
2.21.1.	Магнітопроводи трифазних трансформаторів	67
2.21.2.	Схеми з'єднання обмоток	69
2.22.	Особливості неробочого ходу трифазних трансформаторів	70
2.23.	Групи з'єднання трансформаторів	74
2.24.	Паралельна робота трансформаторів	78
2.24.1.	Вимоги та умови паралельної роботи трансформаторів	78
2.24.2.	Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації	78
2.24.3.	Паралельна робота трансформаторів, які належать до різних груп з'єднання	82
2.24.4.	Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання	83
2.25.	Спеціальні трансформатори	86
2.25.1.	Багатообмоткові трансформатори	86
2.25.2.	Автотрансформатор	88
2.25.3.	Вимірювальні трансформатори	91
	Контрольні запитання	92
3.	ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ	95
3.1.	Принципи виконання обмоток машин змінного струму	95
3.1.1.	Загальні положення	95
3.1.2.	Призначення обмоток статора	95
3.1.3.	Класифікація обмоток статора	96
3.1.4.	Маркування виведень обмоток статорів машин змінного струму	99

3.1.5.	Принципи виконання обмоток статорів машин змінного струму	100
3.1.6.	Електричні та геометричні градуси.....	101
3.2.	Одношарові обмотки статора.....	102
3.2.1.	Класифікація одношарових обмоток	102
3.2.2.	Шаблонна обмотка.....	102
3.2.3.	Концентрична одношарова двоплощинна обмотка	104
3.2.4.	Одношарова обмотка «врозвалку».....	106
3.3.	Двошарові обмотки статора	108
3.3.1.	Застосування двошарових обмоток	108
3.3.2.	Двошарова обмотка з цілою кількістю пазів на полюс і фазу.....	108
3.3.3.	Двошарова обмотка з дробовою кількістю пазів на полюс і фазу	110
3.4.	ЕРС обмотки статора.....	112
3.4.1.	ЕРС секції	112
3.4.2.	ЕРС секційної групи	116
3.4.3.	Треті та кратні трьом гармоніки ЕРС	119
3.4.4.	ЕРС фазної обмотки	120
3.4.5.	Зубцеві гармоніки ЕРС	123
3.4.6.	Вимоги до обмоток статора машин змінного струму	126
3.5.	МРС обмотки статора.....	127
3.5.1.	Умови аналізу МРС обмоток машин змінного струму.....	127
3.5.2.	МРС зосередженої обмотки.....	127
3.5.3.	МРС одношарової розподіленої фазної обмотки	130
3.5.4.	МРС двошарової фазної обмотки з укороченим кроком.....	132
3.5.5.	Пульсуюча та обертова хвилі МРС	133
3.5.6.	Обертова хвиля першої гармоніки МРС трифазної обмотки	136
3.5.7.	Обертові хвилі вищих гармонік МРС трифазної обмотки.	140
3.6.	Магнітні поля, створені обмоткою статора машин змінного струму.....	144
3.6.1.	Загальні положення.....	144
3.6.2.	Магнітне поле повітряного проміжку	145
3.6.3.	Головні індуктивні опори машин змінного струму	147

3.6.4.	Індуктивні опори розсіювання обмоток машин змінного струму	149
3.7.	Магнітний розрахунок електричних машин	152
3.7.1.	Загальні положення	152
3.7.2.	Розрахунок магнітних напруг окремих ділянок магнітного кола електричної машини	155
3.7.3.	Магнітна характеристика електричної машини	160
	Контрольні запитання	162
4.	АСИНХРОННІ МАШИНИ	165
4.1.	Загальні відомості	165
4.2.	Паспортні дані асинхронних машин	166
4.3.	Принцип дії асинхронної машини	166
4.4.	Конструкція асинхронних машин	169
4.5.	Асинхронна машина при нерухомому роторі.....	171
4.5.1.	Загальні положення	171
4.5.2.	Зведення обмотки ротора до обмотки статора.....	172
4.5.3.	Асинхронна машина при нерухомому роторі та замкненій накоротко обмотці ротора	173
4.5.4.	Особливі режими асинхронної машини при нерухомому роторі	178
4.6.	Енергетична діаграма та ККД асинхронної машини.....	180
4.7.	Заміна реального обертового ротора асинхронної машини еквівалентним нерухомим	185
4.8.	Т-подібна схема заміщення асинхронної машини	188
4.9.	Г-подібна схема заміщення асинхронної машини.....	190
4.10.	Векторна діаграма асинхронної машини.....	193
4.11.	Електромагнітний момент асинхронної машини	194
4.12.	Механічна (внутрішня) характеристика асинхронної машини	196
4.13.	Механічна характеристика асинхронного двигуна.....	200
4.14.	Стійкість роботи електричних двигунів.....	201
4.15.	Електромагнітні моменти від вищих гармонік МРС	204
4.15.1.	Загальні положення	204
4.15.2.	Асинхронні моменти	205
4.15.3.	Синхронні моменти.....	206
4.16.	Робочі характеристики асинхронних двигунів	210

4.17.	Пуск асинхронного двигуна	212
4.17.1.	Проблеми пуску	212
4.17.2.	Способи пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.....	213
4.17.3.	Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором	215
4.17.4.	Асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками	217
4.18.	Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.....	219
4.18.1.	Загальні положення	219
4.18.2.	Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміною частоти живлячої напруги	220
4.18.3.	Регулювання частоти обертання зміною кількості пар полюсів обмотки статора	223
4.18.4.	Регулювання частоти обертання зміною величини живлячої напруги.....	228
4.18.5.	Регулювання частоти обертання ввімкненням до кола обмотки ротора додаткового активного опору.....	229
4.19.	Однофазні асинхронні двигуни	230
4.19.1.	Принципи отримання однофазних асинхронних двигунів	230
4.19.2.	Основи робочого процесу однофазних асинхронних двигунів	231
4.19.3.	Пуск однофазних асинхронних двигунів	234
4.19.4.	Конденсаторний асинхронний двигун.....	237
4.20.	Гальмові режими асинхронних двигунів	239
4.21.	Асинхронні генератори.....	240
	Контрольні запитання	245
5.	СИНХРОННІ МАШИНИ	247
5.1.	Загальні відомості	247
5.2.	Паспортні дані синхронних машин.....	248
5.3.	Принцип дії синхронної машини	248
5.4.	Конструкція синхронних машин	251
5.4.1.	Статор синхронної машини.....	251
5.4.2.	Ротор синхронної машини	252
5.4.3.	Системи охолодження синхронних машин	254
5.4.4.	Збудження синхронних машин	254

5.4.5.	Приклади застосування синхронних машин.....	256
5.5.	Магнітне поле збудження синхронної машини	257
5.5.1.	Загальні положення.....	257
5.5.2.	Магнітне поле збудження явнополюсної синхронної машини	259
5.5.3.	Магнітне поле збудження неявнополюсної синхронної машини	261
5.6.	Реакція якоря синхронної машини	264
5.6.1.	Магнітне поле обмотки статора синхронної машини	264
5.6.2.	Реакція якоря неявнополюсної синхронної машини	265
5.6.3.	Реакція якоря явнополюсної синхронної машини	268
5.6.4.	Зведення обмотки статора до обмотки збудження синхронної машини	273
5.7.	Індуктивні опори синхронної машини	275
5.7.1.	Індуктивні опори реакції якоря синхронної машини	275
5.7.2.	Індуктивний опір розсіювання обмотки статора синхронної машини	276
5.7.3.	Синхронні індуктивні опори синхронної машини.....	276
5.8.	Векторні діаграми синхронних машин без урахування насичення	278
5.8.1.	Загальні зауваження	278
5.8.2.	Основна діаграма ЕРС (діаграма Блонделя).....	278
5.8.3.	Перетворена векторна діаграма ЕРС синхронної машини	281
5.9.	Система відносних одиниць синхронної машини	283
5.10.	Характеристика неробочого ходу	284
5.11	Характеристика короткого замикання	286
5.12.	Визначення індуктивних опорів за допомогою характеристик синхронної машини	287
5.13	Відношення короткого замикання синхронної машини	287
5.14.	Векторні діаграми синхронних машин з урахуванням насичення	289
5.14.1.	Векторна діаграма синхронної неявнополюсної машини (векторна діаграма Потье	289
5.14.2.	Векторна діаграма синхронної явнополюсної машини	291
5.15.	Енергетична діаграма та ККД синхронної машини.....	294

5.16.	Характеристики синхронного генератора при автономній роботі	295
5.16.1.	Зовнішня характеристика синхронного генератора.....	295
5.16.2.	Регульовальна характеристика синхронного генератора	296
5.16.3.	Навантажувальна характеристика синхронного генератора.....	298
5.16.4.	Визначення індуктивного опору розсіювання обмотки статора за допомогою характеристичного трикутника (трикутника Потьє)	298
5.17.	Паралельна робота синхронного генератора з мережею нескінченної потужності	301
5.17.1.	Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею нескінченної потужності.....	301
5.17.2.	Регулювання активної потужності синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності	306
5.17.3.	Кутова характеристика синхронного генератора.....	307
5.17.4.	Регулювання реактивної потужності синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності	312
5.17.5.	U-подібні характеристики синхронної машини	313
5.17.6.	Кутові характеристики реактивної потужності синхронної машини при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності	316
5.18.	Стійкість роботи синхронних машин	317
5.18.1.	Статична стійкість синхронної машини	317
5.18.2.	Кількісна оцінка статичної стійкості синхронної машини	320
5.18.3.	Динамічна стійкість синхронної машини.....	322
5.18.4.	Кількісна оцінка динамічної стійкості синхронної машини	324
5.19.	Синхронний двигун	326
5.19.1.	Галузь застосування	326
5.19.2.	Рівняння та векторна діаграма синхронного двигуна	326
5.19.3.	Режими роботи синхронного двигуна.....	327
5.19.4.	Пуск синхронних двигунів	331
5.19.5.	Робочі характеристики синхронного двигуна	335

5.20.	Синхронний компенсатор	336
	Контрольні запитання	338
6.	МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	341
6.1.	Загальні відомості	341
6.2.	Паспортні дані машин постійного струму	341
6.3.	Принцип дії машин постійного струму.....	342
6.4.	Конструкція машин постійного струму.....	345
6.5.	Обмотки якоря машин постійного струму.....	349
6.5.1.	Конструкція обмотки якоря	349
6.5.2.	Параметри обмотки якоря	349
6.5.3.	Проста петльова обмотка	350
6.5.4.	Складна петльові обмотка	356
6.5.5.	Проста хвильова обмотка	357
6.5.6.	Складна хвильова обмотка	360
6.5.7.	Умови симетрії обмотки якоря	361
6.5.8.	Зрівняльні з'єднання обмотки якоря	362
6.5.9.	Комбінована обмотка якоря.....	366
6.5.10.	Межі застосування типів обмоток якоря.....	369
6.6.	ЕРС обмотки якоря машини постійного струму	369
6.7.	Електромагнітний момент машини постійного струму	370
6.8.	Реакція якоря машини постійного струму.....	371
6.8.1.	Визначення реакції якоря машини постійного струму	371
6.8.2.	Магнітне поле обмотки головних полюсів (магнітне поле збудження	372
6.8.3.	Магнітне поле обмотки якоря.....	372
6.8.4.	Результуюче магнітне поле машини постійного струму	375
6.8.5.	Засоби боротьби з реакцією якоря машини постійного струму	377
6.9.	Комутація машини постійного струму.....	379
6.9.1.	Визначення терміну «комутація.....	379
6.9.2.	Причини іскріння машин постійного струму.....	379
6.9.3.	Основне рівняння комутації.....	380
6.9.4.	Класична теорія комутації (комутація опором.....	382
6.9.5.	Рівняння комутації опором	384
6.9.6.	Розрахунок ЕРС комутуючої секції.....	387
6.9.7.	Засоби поліпшення комутації.....	389

6.10.	Енергетична діаграма та ККД машини постійного струму	391
6.11.	Генератори постійного струму	393
6.11.1.	Загальні зауваження	393
6.11.2.	Основні рівняння генераторів постійного струму.....	395
6.11.3.	Характеристики генераторів незалежного збудження	397
6.11.4.	Характеристики генераторів постійного струму паралельного збудження.....	401
6.11.5.	Характеристики генераторів постійного струму послідовного збудження.....	405
6.11.6.	Характеристики генераторів постійного струму змішаного збудження	405
6.12.	Двигуни постійного струму	406
6.12.1.	Загальні положення	406
6.12.2.	Основні рівняння двигунів постійного струму	407
6.12.3.	Стійкість роботи двигунів постійного струму.....	410
6.12.4.	Характеристики двигунів постійного струму паралельного та незалежного збудження	411
6.12.5.	Двигуни постійного струму послідовного збудження	414
6.12.6.	Робочі характеристики двигунів постійного струму паралельного збудження.....	417
6.12.7.	Робочі характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження.....	418
6.12.8.	Порівняння двигунів постійного струму паралельного та послідовного збудження	419
6.12.9.	Двигуни постійного струму змішаного збудження.....	420
6.12.10.	Пуск двигунів постійного струму	420
6.12.11.	Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму	423
6.12.12.	Гальмування двигунів постійного струму.....	434
	Контрольні запитання	437
	Предметний покажчик	439
	Список літератури	442

Навчальне видання

ОСТАШЕВСЬКИЙ Микола Олександрович
ЮР'ЄВА Олена Юріївна

за ред. В. І. Мілих

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І ТРАНСФОРМАТОРИ

навчальний посібник
для студентів, що навчаються
за галуззю знань “Електрична інженерія»

Відповідальний за випуск В. П. Шайда
Роботу рекомендував до видання В. Т. Долбня
Редактор О. В. Козюк

План 2017 р., поз. 20

Підписано до друку 28.04.2017 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Друк цифровий. Гарнітура Georgia.
Ум. друк. арк. 26,0. Наклад – 100 прим. Зам. № 9/05/2017.

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А. М.
Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.02.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6
тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87
copy@vlavke.com.ua, <http://vlavke.com.ua>

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І ТРАНСФОРМАТОРИ

**Кафедра електричних машин
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**



Мілих Володимир Іванович
доктор технічних наук, професор
нагороджений почесним знаком
«Відмінник освіти України»
завідувач кафедри
e-mail: mviketkri@gmail.com



Осташевський Микола Олександрович
кандидат технічних наук, доцент
професор кафедри



Юр`ева Олена Юріївна
кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри
e-mail: ele6780@gmail.com

Сайт кафедри електричних машин
<http://web.kpi.kharkov.ua/elmash>