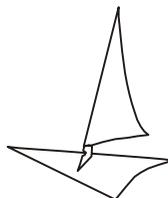


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний морський технічний університет
імені адмірала Макарова

А.Т. КІНАШ

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
Електричні машини

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник*



Миколаїв
УДМТУ
2003

УДК 621.3

ББК 31.26

К 41

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник, лист № 14/182–2404 від 16.12.2002 р.

Рецензенти:

Ю.П. Кондратенко, доктор технічних наук, професор;

В.А. Скороходов, кандидат технічних наук, професор

Кінаш А.Т.

К 41 Електротехніка. Електричні машини: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 152 с.

ISBN 5–87848–080–8

Посібник містить основні відомості з теорії електричних машин. Розглянуто питання щодо їх практичного використання. Наведені числові приклади та тестові завдання для самостійного розв'язання.

Призначено для індивідуальної роботи студентів неелектротехнічних спеціальностей денного і заочного відділень та дистанційного навчання студентів вищих навчальних закладів.

УДК 621.3

ББК 31.26

ISBN 5–87848–080–8

© Кінаш А.Т., 2003

© Видавництво УДМТУ, 2003

ВСТУП

Електротехніка є наукою про технічне використання електрики і магнетизму в господарстві. Без досить глибокого знання електротехніки неможливо уявити собі інженерів сучасного високорозвинутого виробництва.

Інтенсивне використання електричної енергії пов'язано з наступними її особливостями: можливістю досить легкого перетворення в інші види енергії (механічну, теплову, променисту і т. д.); можливістю централізованого й економічного отримання на різних електростанціях; простотою передачі за допомогою ліній електропередачі з малими втратами на великі відстані до споживачів.

Електротехнічне устаткування сучасних суден являє собою комплекс різноманітних електричних машин, апаратів і приладів. Оснащеність морських суден електричними машинами, апаратами та приладами продовжує збільшуватися, енергооснащеність суден зростає з кожним роком. Майже всі механізми таких суден обладнані електричним приводом, більшість з них з автоматизованим керуванням. Роль обслуговуючого персоналу на таких суднах зводиться до спостереження за електроустаткуванням і усунення несправностей.

Електрична енергія володіє цілим рядом переваг у порівнянні з іншими видами енергії. Вона у великих кількостях може передаватися на значні відстані, легко перетворюється в інші види енергії, добре розподіляється між приймачами енергії, забезпечуючи будь-яку потужність приймача (від часток вата до десятків тисяч кіловат), дозволяє здійснити комплексну автоматизацію підприємств і суден.

Електричні і магнітні явища відомі людству давно (кілька століть), але практичне застосування електричної енергії почалося лише

в другій половині XIX століття. При цьому першими приймачами електроенергії були джерела електричного світла та установки зв'язку (телеграф і телефон).

Великий внесок у розвиток науки про електричні явища зробили вчені – академіки М.В. Ломоносов, Г.В. Рихман і В.В. Петров, що провели ряд важливих досліджень з електрики.

Після відкриття англійцем М. Фарадеєм явища електромагнітної індукції (1831 р.) російські академіки Е.Х. Ленц і Б.С. Якобі розробили принцип перетворення електричної енергії в механічну. У 1834 р. Якобі винайшов перший у світі електричний двигун постійного струму, а в 1838 р. установив його на катері для приводу гребного гвинта. Це був перший у світі електрохід. Велику допомогу Е.Х. Ленцу і Б.С. Якобі надав професор А.С. Столетов, який обґрунтував розрахунки магнітних кіл електричних машин. Ленц відкрив принцип оборотності електричних машин, що сприяло інтенсивному виробництву електричних генераторів і двигунів. Перші електромашини виготовлялися на постійному струмі і були дуже громіздкими й дорогими, що гальмувало їхнє поширення.

У 1873–1874 рр. інженером А.Н. Лодигіним була винайдена лампа накалювання – прообраз сучасних ламп цього типу, а в 1876 р. інженером П.Н. Яблочковим сконструйована дугова лампа. Це були перші у світі джерела електричного світла.

На морських суднах електрична енергія вперше стала застосовуватися для освітлення палуб і приміщень за допомогою прожекторів з дуговими лампами (1880 р.). Електроенергія для цих установок вироблялася в невеликих низьковольтних генераторах постійного струму, які були встановлені на суднах і приводилися в рух паровими машинами.

У 1891 р. на Всесвітній електротехнічній виставці інженер М.О. Доливо-Добровольський продемонстрував відкриту ним систему трифазного струму та елементи цієї системи: синхронні генератори, асинхронні електродвигуни і трансформатори. У даний час трифазна система електричного струму займає домінуюче положення в одержанні, передачі і розподілі електроенергії, як найбільш економічна, а асинхронні електродвигуни, дуже прості за конструкцією і дешеві, широко застосовуються у всіх галузях народного господарства, у тому числі на суднах. Електродвигуни постійного і змінного

струму поступово замінили на суднах парові машини для приводу допоміжних механізмів.

Перші спроби створення електрогребної установки на підводному човні відносяться до 1861 р. Електроходи будуються з 1904 р. (наливне річкове судно "Вандал"). У 80-х роках ХІХ сторіччя починає здійснюватися електричний привід суднових механізмів. Першими були електрифіковані вентилятори, потім кермові пристрої і палубні механізми.

Для живлення електроенергією на суднах установлюють електростанції, потужність яких уже в 90-х роках досягала сотень кіловат. До 1940 р. електростанції на морських суднах будували головним чином на постійному струмі. Останнім часом у зв'язку із зростанням потужностей суднових електроенергетичних установок та створенням надійного електроустаткування на змінному струмі суднові електростанції в основному будують на змінному струмі.

Наприкінці ХІХ століття в зв'язку з відкриттям трансформатора П.М. Яблочковим та І.Ф. Усагіним одержала велике поширення передача електроенергії на відстань. Теоретичні основи передачі електроенергії розроблені проф. Д.А. Лачіновим.

Після одержання електромагнітних коливань фізиком Г.Р. Герцом учений А.С. Попов у 1895 р. став творцем бездротового телеграфу, а в 1896 р. передав в ефір першу у світі радіограму. Через два роки він установив регулярний радіозв'язок між крейсером "Африка" і транспортним судном "Європа".

У даний час створюються різноманітні пристрої з електронними, напівпровідниковими й електромагнітними елементами, автоматичні промислові роботи і маніпулятори. З їхньою допомогою удосконалюються технологічні процеси, системи керування, контролю й інформації.

Без використання електротехніки неможливі були б успіхи в медицині, біології, екології й в інших галузях науки.

1. МАГНІТНІ КОЛА

1.1. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою

Робота багатьох електротехнічних пристроїв основана на використанні індукційної та силової дій магнітного поля.

Індукційна дія магнітного поля полягає в тому, що в котушці, яка пронизується змінним магнітним потоком, та в провіднику, що рухається відносно магнітного поля, індукується ЕРС. На використанні індукованих ЕРС засновано принцип дії генераторів, трансформаторів, багатьох приладів контролю та управління. Силова дія магнітного поля полягає в тому, що на електричні заряди, провідники зі струмом і деталі із феромагнітних матеріалів, які знаходяться в магнітному полі, діють електромагнітні сили.

Використання силової дії магнітного поля лежить в основі принципу дії електродвигунів, електромагнітів, багатьох електровимірвальних приладів.

Електротехнічні пристрої, принцип дії яких засновано на використанні індукційної або силової дії магнітного поля, називаються електромагнітними.

Магнітне коло – це сукупність пристроїв з феромагнітними елементами, електромагнітні процеси в яких можуть бути пояснені за допомогою понять магніторушійної сили, магнітного потоку та магнітної напруги.

Магнітне коло складається з елементів, які збуджують (створюють) магнітне поле і магнітопровід. До елементів, які збуджують магнітне поле, належать провідники зі струмом і постійні магніти, а до магнітопроводів – різні тіла та середовища, по яких замикаються магнітні лінії збудженого поля.

Магнітне поле, збуджене постійним струмом, графічно показується магнітними силовими лініями і в кожній точці характеризується вектором магнітної індукції B , направленим по дотичній до лінії поля (рис. 1.1).

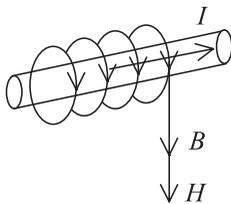


Рис. 1.1

Напрямок поля B визначається правилом гвинта, поступальний рух якого збігається з напрямком струму I , а обертальний – з напрямком магнітної індукції.

Вектор магнітної індукції B характеризує інтенсивність і напрямок руху магнітного поля.

Разом з вектором магнітної індукції використовують і магнітний потік Φ . Магнітний потік – це інтегральна оцінка магнітного поля, тому він може мати як позитивні, так і негативні значення.

При однорідному магнітному полі, коли для всіх точок простору вектор магнітної індукції B зберігає незмінні значення і його напрямок перпендикулярний до площини S ,

$$\Phi = BS.$$

Одиницею вимірювання магнітної індукції є тесла (Тл) або вебер на квадратний метр ($\text{Вб}/\text{м}^2$), а одиницею вимірювання магнітного потоку – вебер (Вб).

При розрахунку магнітних кіл уводиться допоміжна величина – вектор напруженості магнітного поля H , що збігається за напрямком з вектором B :

$$B = \mu H,$$

де μ – абсолютна магнітна проникність середовища, в якому збуджене магнітне поле. Одиницею вимірювання μ є Гн/м.

Абсолютна магнітна проникність вакууму має постійне значення: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Одиниця вимірювання напруженості H – ампер на метр (А/м).

Феромагнітні речовини (залізо, нікель) мають абсолютну магнітну проникність, що в багато разів перевищує μ_0 . Парамагнітними є платина та алюміній, діамагнітними – вісмут і мідь.

Магнітні властивості речовин характеризуються відносною магнітною проникністю

$$\mu_{\text{в}} = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

Властивості феромагнітних речовин показують графіками залежності магнітної індукції B від напруженості магнітного поля H (рис. 1.2).

Ці графіки одержують експериментально.

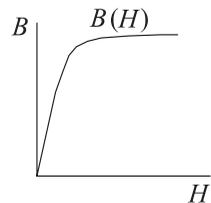


Рис. 1.2

1.1.1. Аналіз магнітних кіл з постійною магніторушійною силою

При аналізі магнітних кіл існує дві задачі.

Пряма магнітна задача – знайти магніторушійну силу (МРС) wI обмотки, необхідну для створення в даному магнітному колі певного магнітного потоку Φ , якщо задані розміри, конфігурація та матеріал магнітопроводу і розміри та конфігурація повітряного проміжку.

Зворотна магнітна задача – знайти магнітний потік Φ у даному магнітному колі, якщо задані значення МРС wI обмотки, розміри, конфігурація і матеріал магнітопроводу та розміри і конфігурація повітряного проміжку.

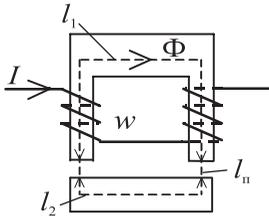


Рис. 1.3

Магнітні кола можуть бути розгалуженими та нерозгалуженими, з однією або кількома МРС.

Зображене на рис. 1.3 магнітне коло має дві однорідні феромагнітні ділянки довжиною l_1 і l_2 , а також два повітряні проміжки довжиною $l_{\text{п}}$ кожний.

Обмотка збудження виконана у вигляді двох котушок із загальною кількістю витків w . Увімкнення цієї котушки до джерела електричної енергії збуджує в її провідниках струм I , внаслідок чого створюється МРС $F = wI$. Ця МРС збуджує основний магнітний потік Φ і невеликий потік розсіювання $\Phi_{\text{роз}}$, який замикається в повітряному середовищі.

Пряма задача

Для розрахунку МРС F , що збуджує основний магнітний потік, визначають з рис. 1.3 довжини l_1, l_2, l_i середньої магнітної лінії на однорідних ділянках магнітопроводу. Нехтуючи потоком розсіювання $\Phi_{\text{роз}}$, знаходять величини магнітної індукції на кожній ділянці магнітопроводу:

$$B_i = \frac{\Phi}{S_i},$$

де S_i – площа поперечного перерізу ділянки магнітопроводу.

Використовуючи знайдені величини B_i , визначають відповідні їм значення напруженості магнітного поля H_i на ділянках маг-

нітопроводу за допомогою основної кривої намагнічування (рис. 1.4).

Для повітряного проміжку, де абсолютна магнітна проникність $\mu = \mu_0$, напруженість магнітного поля визначається за формулою

$$H_{\Pi} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$$

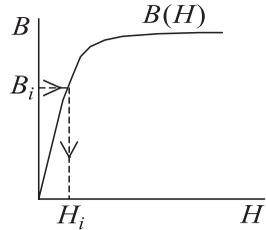


Рис. 1.4

Основні криві намагнічування отримують експериментально.

Застосовують закон повного струму вздовж середньої лінії магнітопроводу

$$\sum H_i l_i = \sum w I.$$

Ураховуючи, що в межах кожної однорідної ділянки величина напруженості магнітного поля постійна, маємо

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2 H_{\Pi} l_{\Pi} = w I.$$

Щоб урахувати потік розсіювання, треба значення МРС $F = w I$ збільшити на 10...20 %.

Величина $H_i l_i$ – магнітна напруга однорідної ділянки.

Розгалужене магнітне коло

У розгалуженому магнітному колі (рис. 1.5) величини магнітних потоків знаходять з принципу неперервності магнітного потоку, згідно з яким алгебраїчна сума магнітних потоків окремих ділянок кола, що сходяться в одному вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum \Phi_i = 0,$$

а також із закону повного струму. Алгебраїчна сума добутків напруженостей магнітного поля на відповідні їм довжини однорідних ділянок контуру магнітного кола дорівнює алгебраїчній сумі МРС цього ж контуру:

$$\sum H_i l_i = \sum w_i I_i.$$

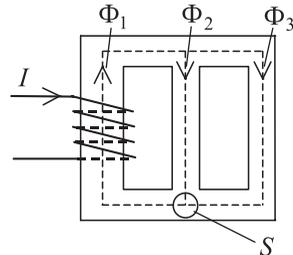


Рис. 1.5

Стосовно вузла S рівняння неперервності магнітного потоку має вигляд

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0.$$

Рівняння за законом повного струму для контурів I та II:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = wI; \quad H_3 l_3 - H_2 l_2 = 0.$$

Аналогова схема заміщення магнітного кола з постійною МРС

Розглянемо магнітне коло (рис. 1.6). Позначимо середні значення магнітної індукції B_1, B_2, B_{Π} і напруженості магнітного поля H_1, H_2 та H_{Π} на ділянках 1, 2 і 3.

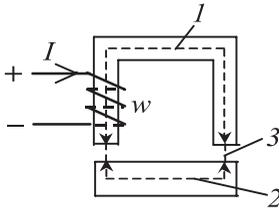


Рис. 1.6

Магнітними полями розсіювання нехтуємо, значення магнітного потоку в будь-якому перерізі магнітного кола беремо однаковим:

$$B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_{\Pi} S_{\Pi} = \Phi.$$

Рівняння за законом повного струму має вигляд

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\Pi} l_{\Pi} = wI.$$

Поділимо кожен складову цього рівняння на магнітний потік:

$$\frac{H_1 l_1}{B_1 S_1} + \frac{H_2 l_2}{B_2 S_2} + \frac{H_{\Pi} l_{\Pi}}{B_{\Pi} S_{\Pi}} = \frac{wI}{\Phi}. \quad (1.1)$$

Уведемо позначення:

магнітний опір першої ділянки

$$\frac{H_1 l_1}{B_1 S_1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} = R_{M1}; \quad (1.2)$$

магнітний опір другої ділянки

$$\frac{H_2 l_2}{B_2 S_2} = \frac{l_2}{\mu_2 S_2} = R_{M2}; \quad (1.3)$$

магнітний опір повітряного проміжку

$$\frac{H_{\Pi} l_{\Pi}}{B_{\Pi} S_{\Pi}} = \frac{l_{\Pi}}{\mu_{\Pi} S_{\Pi}} = R_{\text{м.п.}} \quad (1.4)$$

Підставимо значення (1.2)–(1.4) в рівняння (1.1):

$$R_{\text{м1}} + R_{\text{м2}} + R_{\text{м.п.}} = \frac{wI}{\Phi};$$

$$R_{\text{м1}} \Phi + R_{\text{м2}} \Phi + R_{\text{м.п.}} \Phi = wI; \quad (1.5)$$

$$(R_{\text{м1}} + R_{\text{м}} + R_{\text{м.п.}}) \Phi = wI;$$

$$U_{\text{м1}} + U_{\text{м2}} + U_{\text{м.п.}} = wI, \quad (1.6)$$

де $R_{\text{м1}} \Phi = U_{\text{м1}}$, $R_{\text{м2}} \Phi = U_{\text{м2}}$, $R_{\text{м.п.}} \Phi = U_{\text{м.п.}}$.

Закон Ома для магнітного кола має вигляд

$$\Phi = \frac{wI}{R_{\text{м1}} + R_{\text{м2}} + R_{\text{м.п.}}}$$

Залежність магнітного потоку від магніторушійної сили і магнітних опорів ділянок магнітного кола (1.6) називають основним законом магнітного кола. Неважко помітити певну формальну аналогію в запису рівняння (1.5) і рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа для схеми кола (рис. 1.7). Дійсно, для цього електричного кола можна записати

$$U_1 + U_2 + U_3 = E \quad \text{або}$$

$$R_1 I + R_2 I + R_3 I = E.$$

Струм в електричному колі

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

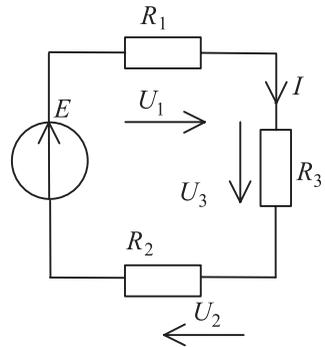


Рис. 1.7

Покажемо аналогію між магнітними та електричними величинами:

Магнітна величина	Електрична величина
Φ , Вб	I , А
wI , А	E , В
R_M , 1/(Ом·с)	R , Ом
U_M , А	U , В

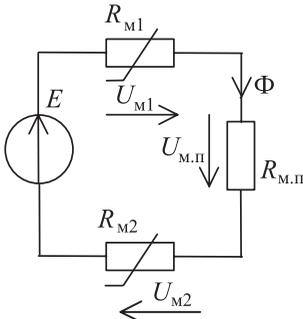


Рис. 1.8

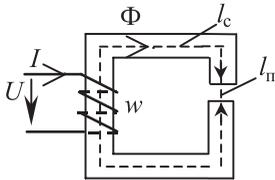


Рис. 1.9

Користуючись цією аналогією, можна зобразити аналогову схему заміщення магнітного кола (рис. 1.8).

Елементи R_{M1} і R_{M2} мають нелінійні вебер-амперні характеристики, а $R_{M.П}$ – лінійну вебер-амперну характеристику.

Приклад 1.1. Знайти значення струму I в намагнічувальній обмотці кола (рис. 1.9). Дано: $\Phi = 6 \cdot 10^{-4}$ Вб, $S = 6$ см², довжина середньої лінії сталі $l_c = 75$ см, довжина повітряного проміжку $l_п = 0,5$ мм, $w = 200$.

Крива намагнічування задана значеннями:

B , Тл	–	0	0,5	0,7	1,0	1,2
H , А/м	–	0	120	200	450	1000

Розсіюванням магнітного поля знехтувати.

Розв'язання. Магнітна індукція в магнітопроводі та зазорі

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в магнітопроводі згідно з кривою намагнічування $H = 450$ А/м; напруженість магнітного поля в зазорі

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 8 \cdot 10^5 \text{ В.}$$

Струм в обмотці

$$I = \frac{H_c l_c + H_n l_n}{w} = \frac{450 \cdot 75 \cdot 10^{-2} + 8 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{200} = 3,69 \text{ А.}$$

Приклад 1.2. Кільцева котушка середнім діаметром $D = 0,15$ м має в поперечному перерізі коло діаметром $d = 0,05$ м. В обмотці з числом витків $w = 450$ проходить постійний струм $I = 1$ А.

Яке значення ЕРС індукується в обмотці, якщо струм припиняється за час $t = 1$ мкс?

Розв'язання. Довжина середньої магнітної лінії

$$l = \pi D = 0,15\pi \text{ м.}$$

Напруженість магнітного поля

$$H = \frac{Iw}{l} = \frac{1 \cdot 450}{0,15} = 3000 \text{ А/м.}$$

Магнітна індукція

$$B = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3000 = 12\pi \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Площа поперечного перерізу

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi l^2}{4} = 0,785 \text{ мм}^2 = 785 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2.$$

Магнітний потік котушки

$$\Phi = BS = 12\pi \cdot 10^{-4} \cdot 785 \cdot 10^{-9} = 0,296 \cdot 10^{-8} \text{ Вб.}$$

Потокозчеплення

$$\psi = \Phi w = 0,296 \cdot 10^{-8} \cdot 450 = 0,133 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

Індукована ЕРС

$$l = \frac{\Delta\psi}{\Delta t} = -\frac{0,133 \cdot 10^{-5}}{10^{-6}} = -1,33 \text{ В.}$$

При наявності феромагнітного осердя ЕРС була б більша в μ разів (μ – магнітна проникність сталі).

1.2. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою

Магнітними колами зі змінною МРС називаються такі кола, магнітне поле яких збуджується котушками, увімкненими до джерела змінного струму. Змінний струм котушки створює в магнітопроводі магнітне поле, зміна якого супроводжується циклічним перемагнічуванням магнітопроводу.

1.2.1. Електромагнітні процеси в дроселі при змінних магнітних потоках

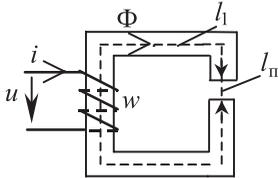


Рис. 1.10

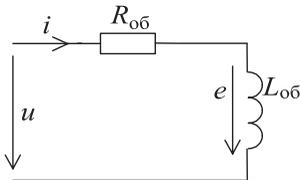


Рис. 1.11

Умовно-позитивні напрямки напруги u , струму i та магнітного потоку Φ показані на рис. 1.10. Нехай магнітопровід виготовлено з феромагнітного матеріалу і всі магнітні силові лінії замикаються по магнітопроводу.

Змінний магнітний потік Φ наводить у витках обмотки ЕРС самоіндукції $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$, яка збігається зі струмом. Обмотка має опір $R_{об}$.

Для показаного на рис. 1.11 контуру запишемо рівняння електричного стану

$$R_{об}i - u = e \quad \text{або} \quad u = -e + R_{об}i.$$

Якщо знехтувати активним опором $R_{об}$ та вважати, що напруга змінюється за законом $u = U_m \sin \omega t$, то можна записати

$$u = -e, \quad U_m \sin \omega t = w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Знаходимо магнітний потік:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_m}{w} \sin \omega t, \quad \Phi = -\frac{U_m}{\omega w} \cos \omega t;$$

якщо амплітудне значення магнітного потоку

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega w}, \quad (1.7)$$

то магнітний потік

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2).$$

З формули (1.7) можна визначити напругу, яка підведена до котушки:

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega w} = \frac{\sqrt{2}U}{\omega w}, \quad U = \frac{1}{\sqrt{2}}\omega w\Phi_m = 4,44 f w \Phi_m.$$

Висновок. Якщо до обмотки ідеалізованої індуктивної котушки з феромагнітопроводом підвести синусоїдну напругу $u = U_m \sin \omega t$, то в магнітному колі створюється магнітний потік Φ , що змінюється за синусоїдним законом, але відстає від напруги на кут $\pi/2$.

При прийнятих обмеженнях ($R_{\text{об}} = 0$, $\Phi = 0$) амплітуда магнітного потоку не залежить від виду характеристик $B_t(H_t)$ магнітопроводу і величини намагнічувального струму.

Властивості феромагнітних матеріалів у змінному магнітному полі

При збудженні змінного магнітного потоку в магнітопроводі електротехнічних пристроїв відбувається безперервне циклічне перемагнічування феромагнітного матеріалу.

Енергія джерела витрачається на покриття втрат від магнітного гістерезису та втрат, пов'язаних з нагрівом магнітопроводу вихровими струмами. Для зменшення цих утрат магнітопровід виготовляють шихтованим зі спеціальної електротехнічної сталі.

Намагнічувальний струм в ідеалізованій котушці з магнітопроводом

Якщо магнітний потік і напруга змінюються за синусоїдним законом, то і магнітна індукція B буде мати синусоїдний характер, а відповідні зміни напруженості, що визначаються за динамічною петлею, будуть несинусоїдними.

Форма намагнічувального струму згідно із законом повного

струму для миттєвих значень повторює форму H_i :

$$i = \frac{H_i I_{\text{ср}}}{w}$$

Форма намагнічувального струму в котушці визначається в першу чергу розмірами і формою динамічної петлі. Величина струму залежить від амплітуди і частоти напруги, товщини листа пакета магнітопроводу та властивостей матеріалу.

У розрахунках реальні несинусоїдні криві замінюють еквівалентними синусоїдами.

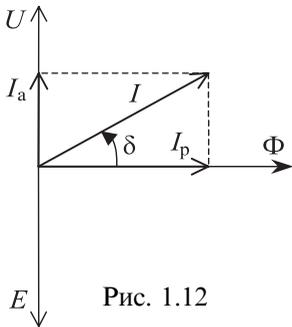


Рис. 1.12

Якщо реальний несинусоїдний струм замінити еквівалентним синусоїдним струмом, то електричний стан кола можна показати у вигляді векторної діаграми (рис. 1.12).

Будувати векторну діаграму починають з вектора магнітного потоку Φ . Змінний синусоїдний струм індукє ЕРС E у витках котушки. Вектор E відстає за фазою від вектора Φ на кут 90° . Струм I випереджає Φ на кут $\delta = 5 \dots 10^\circ$. ЕРС E зрівноважує прикладену до котушки напругу U .

Еквівалентний струм

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (1.8)$$

де I_a – активна складова струму, пов'язана з утратами в магнітопроводі; I_p – реактивна складова, необхідна для збудження основного магнітного потоку.

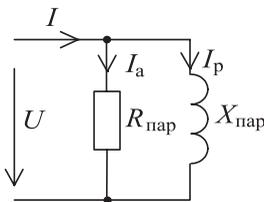


Рис. 1.13

Активна складова струму пов'язана з утратами потужності в магнітопроводі $P = UI_a$, а реактивна намагнічувальна потужність $Q = UI_p$ необхідна для збудження основного магнітного потоку.

Згідно з векторною діаграмою котушка з феромагнітопроводом може бути замінена схемою заміщення (рис. 1.13).

Висновок. Утрати від перемагнічування та вихрових струмів можна моделювати вектором струму I , його активною та реактивною складовими. В еквівалентній паралельній схемі опір $R_{\text{пар}} = U / I_a = P / I_a^2$ обумовлений необхідними втратами потужності в магнітопроводі від гістерезису та вихрових струмів і залежить від частоти живильної напруги та товщини листа пакета магнітопроводу. Індуктивний елемент $X_{\text{пар}} = U / I_p = Q / I_p^2$ визначається реактивною потужністю, що збуджує основний магнітний потік, і залежить від форми та нахилу динамічної петлі.

Якщо виділити активну та реактивну складові напруги, то отримаємо послідовну схему заміщення з параметрами $R_{\text{пос}}$ та $X_{\text{пос}}$ (рис. 1.14).

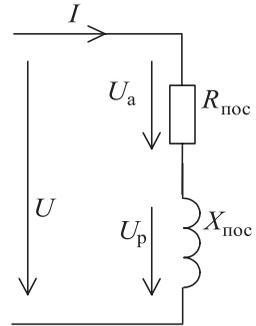


Рис. 1.14

Приклад 1.3. Визначити параметри схеми заміщення котушки зі сталевим осердям (рис. 1.15), якщо при вмиканні її до джерела постійного струму $U_{\text{пост}} = 2 \text{ В}$ у ній встановлюється постійний струм $I_{\text{пост}} = 4 \text{ А}$, а при включенні до джерела синусоїдної напруги $U = 120 \text{ В}$ частотою $f = 50 \text{ Гц}$ діюче значення струму $I = 10 \text{ А}$, а потужність утрат $P = 150 \text{ Вт}$.

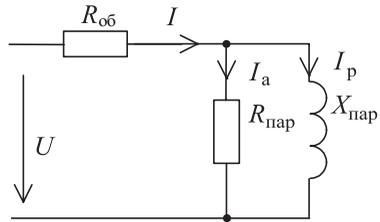


Рис. 1.15

Потоками розсіювання знехтувати.

Розв'язання. Сталевий магнітопровід у котушці при постійному струмі не перемагнічується, тому що в ньому немає вихрових струмів і в котушці не індукуються ЕРС. Опір обмотки визначається за законом Ома:

$$R_{\text{об}} = \frac{U_{\text{пост}}}{I_{\text{пост}}} = \frac{2}{4} = 0,5 \text{ Ом.}$$

При змінному струмі частотою $f = 50 \text{ Гц}$ це значення буде дорівнювати активному опору обмотки котушки.

Електричні втрати потужності

$$P_e = R_{\text{об}} I^2 = 0,5 \cdot 10^2 = 50 \text{ Вт.}$$

Потужність утрат у сталевому осерді котушки при змінному струмі

$$P_c = P - P_e = 150 - 50 = 100 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{150}{120 \cdot 10} = 0,125.$$

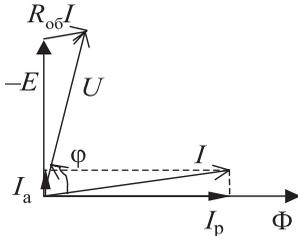


Рис. 1.16

На векторній діаграмі (рис. 1.16) в трикутнику напруг зі сторонами U , $R_{\text{ос}}I$ і $-E$ кут φ знаходиться навпроти сторони $-E$ (ЕРС, яка індукується в обмотці при зміні магнітного потоку).

Отже,

$$\begin{aligned} -E &= U_L = \sqrt{U^2 + (R_{\text{ос}}I)^2 - 2R_{\text{ос}}I \cos \varphi} = \\ &= \sqrt{120^2 + (0,5 \cdot 10)^2 - 2 \cdot 120 \cdot 5 \cdot 0,125}; \quad E = 119,5 \text{ В.} \end{aligned}$$

Активна і реактивна складові струму котушки:

$$I_a = \frac{P}{E} = \frac{100}{119,5} = 0,833 \text{ А}; \quad I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{10^2 - 0,833^2} = 9,95 \text{ А,}$$

де I_p знаходиться з виразу (1.8).

Опори активної та індуктивної гілок схеми заміщення:

$$R_{\text{пар}} = \frac{P}{I_a^2} = \frac{100}{0,833^2} = 144 \text{ Ом}; \quad X_{\text{пар}} = \frac{E}{I_p} = \frac{119,5}{9,95} = 12 \text{ Ом.}$$

Індуктивність

$$L_{\text{пар}} = \frac{X_{\text{пар}}}{\omega} = \frac{12}{314} = 0,0382 \text{ Гн.}$$

1.2.2. Індуктивна котушка з повітряним зазором у магнітопроводі

Як було з'ясовано раніше, повний опір котушки з феромагнітним осердям залежить від діючого значення напруги або струму. Для деяких електротехнічних пристроїв необхідна котушка з незмінною або довільно регульованою індуктивністю; такі котушки застосовуються, наприклад, у фільтрах випрямлячів і зварювальних агрегатах. У цих випадках в осерді котушки роблять зазор, величина якого задається немагнітною прокладкою (рис. 1.17). У ряді пристроїв (електричні машини, індукційні датчики, звукозаписні головки та ін.) необхідність повітряного зазору визначається принципом їхньої дії.

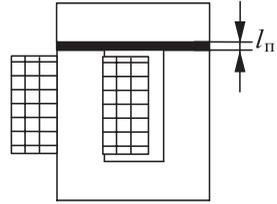


Рис. 1.17

Вплив повітряного зазору розглянемо на прикладі ідеалізованої котушки, для якої $X_p = 0$, $R_{об} = 0$, втрати на гістерезис і вихрові струми в осерді дорівнюють також нулю. У такій котушці активна складова струму дорівнює нулю, котушка має тільки реактивний опір. Для котушки, магнітопровід якої має повітряний зазор шириною l_n , за законом повного струму можна записати рівняння

$$H_n 2l_n + H_c l_c = wi, \quad (1.9)$$

де $H_n 2l_n = u_{м.п}$ – магнітна напруга в повітряному зазорі; $H_c l_c = u_{м.с}$ – магнітна напруга у феромагнітному осерді.

Напруженість поля в обох елементах магнітного кола залежить від індукції $B = \Phi/S$ у магнітопроводі, що згідно з формулою $\Phi = U/(4,44 fw)$ визначається напругою на котушці.

Рівняння (1.9) дозволяє побудувати криву намагнічування осердя з зазором $\Phi(i)$ і визначити форму струму в котушці.

Для побудови такої кривої потрібно скласти магнітні напруги u_m при кількох значеннях індукції (потоку), як показано на рис. 1.18.

Відповідно до отриманої кривої (вебер-амперної характеристики) за-

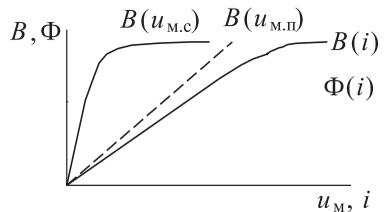


Рис. 1.18

лежність між струмом в обмотці і потоком (індукцією) в осерді виявляється більш лінійною. Тому крива струму в котушці ближча за формою до кривої синусоїдального потоку. Чим більший повітряний зазор у магнітопроводі, тим більша напруга $H_{\text{п}} 2l_{\text{п}} = u_{\text{м.п}}$ на лінійному елементі магнітного кола і тим ближчою до прямої є залежність $\Phi(i)$.

Як і раніше, реальні несинусоїдальні криві $H_{\text{п}}(t)$ і $H_{\text{с}}(t)$ можна замінити еквівалентними синусоїдами та перейти до рівняння для їх діючих значень:

$$U_{\text{м.п}} + U_{\text{м.с}} = wi, \quad (1.10)$$

де $U_{\text{м.п}} = 2l_{\text{п}} \frac{B_{\text{м}}}{\sqrt{2}\mu_0}$ і $U_{\text{м.с}} = H_{\text{с}}l_{\text{с}}$.

Залежність $H(B)$ задається кривою намагнічування феромагнітного осердя на змінному струмі.

Використовуючи рівняння (1.10), можна побудувати вольт-амперну характеристику котушки з осердям, що має повітряний зазор. Для цього потрібно задатися рядом діючих значень напруги на котушці, потім визначити відповідну величину магнітної індукції B .

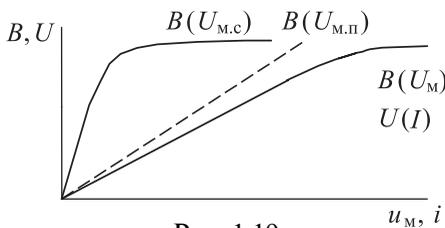


Рис. 1.19

Підставивши в рівняння (1.10) значення магнітних напруг, знайдемо діючі значення еквівалентного синусоїдального струму. Графічне розв'язання рівняння (1.10) показане на рис. 1.19.

Крива $B(I)$ визначає вигляд вольт-амперної характеристики $U(I)$, тому що величини B та U пропорційні.

Повітряний зазор в осерді випрямляє вольт-амперну характеристику котушки, роблячи її практично лінійною на значній ділянці (рис. 1.20, а). Довжина лінійної ділянки багато в чому визначається співвідношенням магнітних напруг у повітряному проміжку і на феромагнітній ділянці магнітопроводу, тобто шириною зазору (див. рис. 1.20, б).

Відношення напруги до струму дорівнює опору на змінному струмі ($Z_0 = U/I$). Тому на лінійній ділянці вольт-амперної характери-

стики опір котушки залишається постійним. Для регулювання опору котушки змінюють величину повітряного зазору в її осерді. При збільшенні зазору ($\delta_2 > \delta_1 > 0$) вольт-амперна характеристика стає все більш положистою, а опір котушки (при $U = \text{const}$) падає, як показано на рис. 1.20,б.

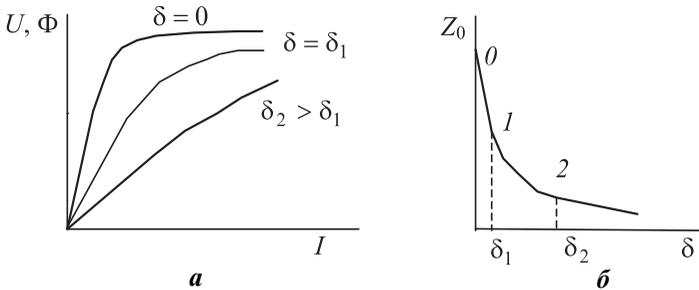


Рис. 1.20

Криві рис. 1.20 показують, що при заданій напрузі U на котушці (поточі в осерді) збільшення повітряного зазору викликає зростання струму намагнічування I . Тому в тих випадках, коли величина зазору не задана спеціальними технічними умовами, прагнуть по можливості зменшити його до гранично малої величини (наприклад, у трансформаторах, магнітних підсилювачах, перетворювачах частоти та інших апаратах).

2. ТРАНСФОРМАТОРИ

2.1. Призначення і конструкція

Трансформатором називається статичний електромагнітний пристрій, що перетворює електричну енергію змінного струму з одним рівнем (діючим значенням) напруги в електричну енергію змінного струму з іншим рівнем напруги при незмінній частоті напруги. Одночасно відбувається перетворення рівня струму в закон збереження енергії:

$$S_1 = U_1 I_1 = S_2 = U_2 I_2,$$

де величини з індексом 1 відносяться до джерела електроенергії, на яке включено трансформатор, а з індексом 2 – до споживачів, включених на це джерело через трансформатор.

Основне призначення трансформаторів – узгодження рівнів номінальних (робочих) напруг (або струмів) джерел і споживачів. На суднах номінальне діюче значення лінійної напруги джерел (синхронних генераторів) дорівнює 230...400 В. Споживачі мають номінальні напруги 12, 36, 127, 220 В та ін. Вони одержують електричну енергію через трансформатори, що іноді називають силовими. Потужність стандартних судових силових трансформаторів складає від сотень ватів до сотень кіловатів.

Для узгодження величин робочих напруг (струмів) електровимірювальних приладів з величинами вимірюваних ними напруг (струмів) застосовуються вимірювальні трансформатори напруги і струму.

Окрему групу складають трансформатори спеціального призначення: судові статичні перетворювачі, зварювальні, автотрансформатори, розділові та ін. До складу радіотехнічних систем, систем керування та пристроїв судової електроавтоматики входять імпульсні, розділові, узгоджувальні, диференціувальні та інші типи малопотужних трансформаторів.

У залежності від числа фаз у колі бувають однофазні і трифазні трансформатори. Трансформатори, які використовуються для зменшення напруг, називаються знижувальними, а для збільшення напруги – підвищувальними. Принципово будь-який трансформатор оборотний: може бути або підвищувальним, або знижувальним.

Варіанти умовного зображення трансформаторів в електричних схемах показані на рис. 2.1 (*а* і *б* – однофазні, *в* і *г* – трифазні).

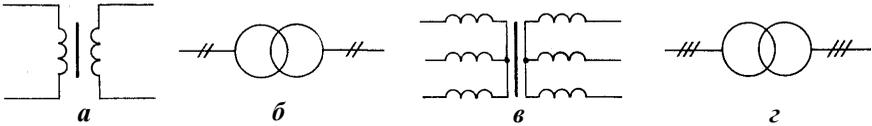


Рис. 2.1

Трансформатор складається з замкнутого феромагнітного осердя та обмоток. Осердя виготовляється з тонких ізольованих одна від одної пластин з феромагнітного матеріалу, який має малу площу петлі гістерезису. Цим досягається зменшення втрат потужності в осерді на вихрові струми та гістерезис. Пластини розташовуються в осерді вздовж силових ліній поля. У цьому напрямку осердя прагнуть гранично зменшити повітряні зазори для зменшення магнітного опору магнітопроводу. Ділянки осердя, на яких розташовані обмотки, називаються стержнями, а вільні від обмоток – ярмами. Обмотки, які роблять з мідного або алюмінієвого проводу з електричною ізоляцією, можуть розташовуватися концентричними кулями, що чергуються, з метою зменшення їхніх потоків розсіювання. Обмотки одна від одної ізолювані.

Найпростіший двообмотковий однофазний трансформатор зображений на рис. 2.2, де показані варіанти розміщення обмоток на різних стержнях: *а* – стержньові; *б* – броньові. Обмотка, яка підключена до джерела змінної напруги, називається первинною. Обмотка, до якої підключається споживач, називається вторинною.

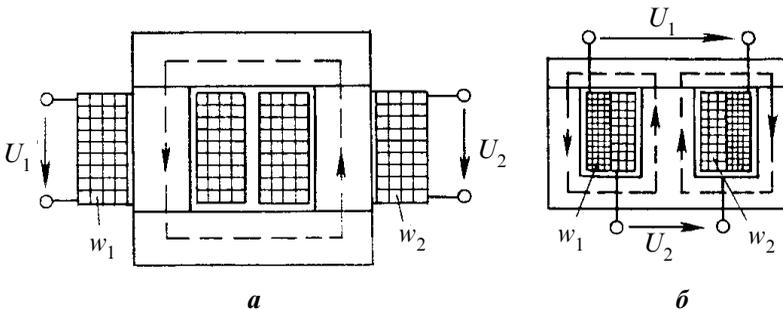


Рис. 2.2

2.2. Принцип роботи трансформатора

Робота трансформатора заснована на явищі взаємоіндукції. Дійсно, якщо первинну обмотку трансформатора підключити до мережі змінного струму з напругою U_1 (див. рис. 2.2,а), то в ній буде проходити струм I_1 , що створить в осерді змінний магнітний потік Φ . Під впливом цього потоку в обох обмотках трансформатора буде індукуватися ЕРС. Якщо при цьому вторинна обмотка буде замкнута, то в ній буде змінний струм I_2 . Таким шляхом і здійснюється передача енергії з первинної обмотки у вторинну, а отже, і перетворення енергії змінного струму однієї напруги в енергію змінного струму іншої напруги.

Миттєві значення ЕРС, що індукуються в обмотках трансформатора, визначаються за законом електромагнітної індукції:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де w_1 і w_2 – кількості витків первинної і вторинної обмоток трансформатора.

При синусоїдальній зміні магнітного потоку $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ маємо

$$e = -w \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -w\Phi_m \omega \cos \omega t = w\Phi_m \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

або

$$e = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

де $E_m = w\omega\Phi_m$ – максимальне значення електрорушійної сили.

Переходячи до діючого значення ЕРС, одержуємо

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{w\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{w2\pi f\Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w \Phi_m.$$

Отже, для обох обмоток трансформатора маємо

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Відношення ЕРС первинної і вторинної обмоток трансформатора, що дорівнює відношенню кількостей їх витків, називається *коефіцієнтом трансформації*

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f w_1 \Phi_m}{4,44 f w_2 \Phi_m} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При роботі трансформатора вхолосту, тобто коли у вторинній обмотці немає струму, а в первинній він має мінімальну величину, можна вважати, що $E_1 \approx U_1$ і $E_2 = U_{02}$. Тому відношення ЕРС, що індукуються в обмотках трансформатора, приблизно дорівнює відношенню напруг на його затискачах:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_{02}}.$$

Таким чином, коефіцієнт трансформації – це відношення напруг на затискачах обмоток при холостому ході трансформатора. Він показує, у скільки разів напруга первинної обмотки більша або менша від напруги вторинної обмотки. Якщо коефіцієнт трансформації більше одиниці, то трансформатор називається знижувальним і, навпаки, трансформатор є підвищувальним, якщо його коефіцієнт трансформації менше одиниці.

Співвідношення між струмами в первинній і вторинній обмотках легко знайти за законом збереження енергії, вважаючи, що енергія, споживана первинною обмоткою з мережі, дорівнює енергії вторинного кола трансформатора, тобто $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

Отже,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{k},$$

тобто струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні напругам на затискачах цих обмоток. Іншими словами, трансформатор є електричним редуктором, що дозволяє при заданій потужності шляхом підвищення напруги зменшувати величину струму і навпаки.

Трансформатори, як і електричні машини, можуть працювати в

двох основних режимах – холостого ходу і під навантаженням. В експлуатаційних умовах може мати місце режим раптового короткого замикання.

2.3. Холостий хід трансформатора

Холостим ходом трансформатора називається такий режим його роботи, коли на первинну обмотку подана напруга U_1 і по ній проходить струм I_0 , а вторинна обмотка розімкнута і струм у ній дорівнює нулю (рис. 2.3). Струм, що протікає по первинній обмотці, у цьому випадку називається струмом холостого ходу. Він створює основний магнітний потік трансформатора Φ , що зчіплюється з

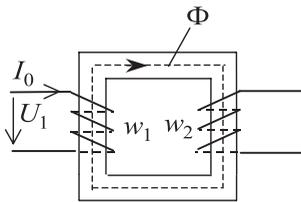


Рис. 2.3

обома обмотками, і потік розсіювання $\Phi_{роз}$, який замикається через повітря та охоплює тільки первинну обмотку. У зв'язку з наявністю втрат у сталі основний магнітний потік буде відставати від струму холостого ходу на кут α , а потік розсіювання буде у фазі з цим струмом, тому що він замикається переважно повітрям.

Основний магнітний потік Φ індукуює в первинній обмотці ЕРС самоіндукції E_1 , а у вторинній – взаємоіндукції E_2 . Потік розсіювання $\Phi_{роз}$, що складає звичайно кілька відсотків від основного потоку, індукуює в первинній обмотці ЕРС розсіювання $E_{роз}$. За своєю природою ця ЕРС є ЕРС самоіндукції і тому може бути визначена з виразу

$$\dot{E}_{роз} = -j\omega L_{роз} \dot{I}_0 = -jX_1 \dot{I}_0,$$

де X_1 – індуктивний опір первинної обмотки трансформатора, що створюється потоком розсіювання.

Таким чином, на підставі другого закону Кірхгофа можна написати рівняння ЕРС для первинної обмотки трансформатора

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{роз} = \dot{I}_0 R_1,$$

де R_1 – активний опір первинної обмотки трансформатора.

Замінюючи в цьому рівнянні ЕРС розсіювання $\dot{E}_{роз} = -j\dot{I}_0 X_1$ і

розв'язуючи рівняння відносно U_1 , одержуємо

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \underline{Z}_1, \quad (2.1)$$

де \dot{E}_1 – ЕРС самоіндукції, що протидіє прикладеній напрузі \dot{U}_1 і тому називається *зворотною*, або *протиелектрорушійною*, силою; $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ – повний опір первинної обмотки; $\dot{I}_0 \underline{Z}_1$ – повний спад напруги в первинній обмотці трансформатора.

На підставі рівняння (2.1), яке є рівнянням рівноваги ЕРС, побудована векторна діаграма (рис. 2.4) холостого ходу трансформатора.

Спочатку відкладається вектор магнітного потоку Φ_m , а від нього в бік випередження на кут δ – вектор струму холостого ходу \dot{I}_0 . Вектори ЕРС \dot{E}_1 і \dot{E}_2 відкладаються під кутом 90° у бік відставання від вектора Φ_m , тому що всяка ЕРС, що індукується змінним потоком, відстає у своїх змінах від потоку на чверть періоду. Вектор $\dot{I}_0 R_1$ знаходиться у фазі зі струмом \dot{I}_0 , а вектор $j\dot{I}_0 X_1$ випереджає на 90° вектор струму. Вектор напруги \dot{U}_1 – це геометрична сума вектора $-\dot{E}_1$ і векторів спаду напруги.

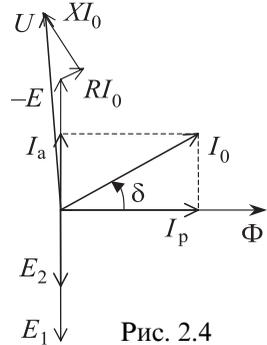


Рис. 2.4

Струм холостого ходу складається з двох складових – активної \dot{I}_a , обумовленої втратами в сталі, та реактивної \dot{I}_p , що створює основний магнітний потік трансформатора і названа тому намагнічувальним струмом, тобто

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + j\dot{I}_p \approx I_0 \cos \varphi_0 + jI_0 \sin \varphi_0.$$

Величина реактивного струму, що намагнічує, звичайно в багато разів більша від активного. Тому кут зсуву φ_0 близький до 90° і трансформатор, що працює вхолосту, навантажує живильну мережу реактивною потужністю.

Струм холостого ходу трансформатора невеликий і, як правило, не перевищує 5...9% від номінального. При незмінній первинній напрузі струм холостого ходу і створюваний ним магнітний потік

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44w_1 f} = \frac{U_1}{4,44w_1 f}$$

практично незмінні. Якщо ж первинна напруга змінюється, то будуть змінюватися амплітуда магнітного потоку і струм холостого ходу. Тому значне збільшення первинної напруги неприпустиме, оскільки при цьому внаслідок насичення різко збільшується струм холостого ходу.

Потужність, споживана трансформатором при холостому ході,

$$P_0 = P_{m1} + P_c + P_d,$$

де $P_{m1} = I_0^2 R_1$ – втрати в міді первинної обмотки, що дуже малі; $P_c = p_{1/50c} (f/50)^{\beta} \beta^2 G_c$ – втрати в сталі осердя; $P_d = (0,15...0,2)P_c$ – додаткові втрати холостого ходу.

Тому що P_{m1} малі і ними можна знехтувати, втрати холостого ходу дорівнюють утратам у сталі й додатковим:

$$P_0 \approx P_c + P_d.$$

Оскільки втрати в сталі пропорційні квадрату магнітної індукції, то можна написати

$$P_0 = P_c \equiv \Phi^2 \equiv E_1^2 \equiv U_1^2,$$

тобто втрати холостого ходу трансформатора пропорційні квадрату прикладеної напруги, і якщо напруга постійна, то і втрати незмінні. Це означає, що втрати холостого ходу залишаються практично незмінними при всіх режимах роботи трансформатора.

2.4. Навантажувальний режим трансформатора

Режим роботи трансформатора, при якому до первинної обмотки підведена напруга U_1 , а вторинна замкнута на зовнішній опір Z_H

деякого споживача (рис. 2.5), називається навантажувальним (або робочим) режимом трансформатора. Цей режим роботи трансформатора є основним, тому що в цьому випадку здійснюється передача електроенергії з первинного кола у вторинне.

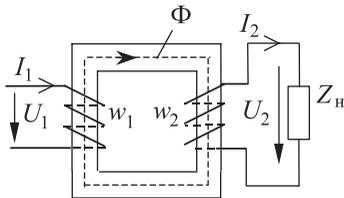


Рис. 2.5

У трансформаторі при навантажен-

ні відбуваються фізичні процеси. При замиканні вторинної обмотки на зовнішній опір у ній під впливом ЕРС E_2 виникає струм I_2 . Цей струм створює в осерді трансформатора свій магнітний потік. Частина потоку, яка замикається по повітрю навколо витків вторинної обмотки, створює магнітний потік розсіювання $\Phi_{\text{роз2}}$, що наводить в обмотці ЕРС розсіювання $E_{\text{роз2}}$. Величина цієї ЕРС, як і для первинної обмотки, може бути визначена за рівнянням

$$\dot{E}_{\text{роз2}} = -j\omega L_{\text{роз2}} \dot{I}_2 = -jX_2 \dot{I}_2,$$

де X_2 – індуктивний опір вторинної обмотки, що створюється потоком розсіювання.

Інша (більша) частина магнітного потоку Φ_2 , створюваного струмом I_2 , замикається по осерді трансформатора і, відповідно до закону Ленца, протидіє магнітному потоку Φ_1 , створюваному первинною обмоткою. Отже, при навантаженні основний магнітний потік трансформатора Φ , що зчіплюється з первинною і вторинною обмотками, створює магніторушійні сили первинної $I_1 w_1$ та вторинної $I_2 w_2$ обмоток. Якщо $I_1 w_1$ намагнічує трансформатор, то $I_2 w_2$ розмагнічує його. Здавалося б, при збільшенні навантаження основний магнітний потік $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2$ повинен зменшуватися, а при зменшенні навантаження – збільшуватися. Насправді ж основний магнітний потік трансформатора практично залишається без зміни.

Дійсно, до трансформатора як при холостому ході, так і при навантаженні, підводиться та сама напруга U_1 . З деяким наближенням можна вважати, що ця напруга зрівноважується ЕРС первинної обмотки E_1 , тобто $U_1 \approx E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m$. Отже, основний магнітний потік

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 w_1 f}$$

не залежить від навантаження трансформатора і при $U_1 = \text{const}$ залишається практично незмінним та дорівнює потоку в режимі холостого ходу.

Оскільки при холостому ході основний магнітний потік Φ створюється магніторушійною силою $I_0 w_1$, а при навантаженні – спільною дією магніторушійних сил $I_1 w_1$ та $I_2 w_2$, то можна написати

рівняння магніторушійних сил трансформатора

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2.$$

Розв'язавши рівняння МРС відносно струму \dot{I}_1 , одержимо

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{1}{k} \dot{I}_2 \right).$$

З цього виразу видно, що струм \dot{I}_1 можна розглядати як суму двох доданків: струму холостого ходу \dot{I}_0 , що створює основний магнітний потік Φ , і навантажувального струму $-\frac{1}{k} \dot{I}_2$, який компенсує дію вторинного розмагнічувального струму. Тому при кожній зміні струму I_2 у вторинній обмотці автоматично змінюється струм I_1 у первинній, тобто в трансформаторі має місце процес саморегулювання. Автоматичним електромагнітним механізмом цього процесу є незначні коливання основного магнітного потоку трансформатора.

Рівняння електричної рівноваги для первинної і вторинної обмоток трансформатора мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де U_2 – напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора; $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ – комплексний повний опір первинної обмотки; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ – комплексний повний опір вторинної обмотки; $\dot{I}_1 \underline{Z}_1$, $\dot{I}_2 \underline{Z}_2$ – комплексний спад напруги в обмотках трансформатора.

На підставі рівнянь (2.2) можна побудувати векторну діаграму навантаженого трансформатора. Однак у більшості випадків $w_1 \neq w_2$, завдяки чому ЕРС, струми і параметри обмоток трансформатора відрізняються за величиною. Ця обставина ускладнює побудову векторних діаграм, зокрема для первинного і вторинного кіл необхідно мати різні масштаби. З метою усунення цього недоліку обидві обмотки трансформатора приводять до одного числа витків

і називають такий трансформатор *приведеним*. Звичайно всі величини вторинної обмотки приводять до величин первинної через коефіцієнт трансформації. Приведені величини позначаються E'_2, I'_2, R'_2, X'_2 і т. д., тобто так само, як і дійсні величини, але зі штрихом зверху.

Приведені величини трансформатора, виходячи зі співвідношення $E_1 : E_2 = k$ та енергетичної еквівалентності заміни

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2, U_2 I_2 = U'_2 I'_2, I_2^2 R_2 = I'^2_2 R_2 = I'^2_2 R'_2 \text{ та } I'^2_2 X^2 = I'^2_2 X_2,$$

відповідно рівні:

$$\left. \begin{aligned} E'_2 &= \frac{w_1}{w_2} E_2 = k E_2 = E_1; \\ U'_2 &= \frac{w_1}{w_2} U_2 = k U_2; \\ I'_2 &= \frac{w_1}{w_2} I_2 = \frac{1}{k} I_2; \\ R'_2 &= \frac{I_2^2}{I'^2_2} R_2 = \frac{I_2^2}{\left(\frac{1}{k} I_2\right)^2} R_2 = k^2 R_2; \\ X'_2 + \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 X_2 &= k^2 X_2; \\ Z'_2 = R'_2 + jX'_2 &= k^2 Z_2. \end{aligned} \right\}$$

Відповідно до приведених величин вторинної обмотки рівняння струмів в ЕРС переписуться так:

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= I_0 + (-I'_2); \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 X'_2. \end{aligned} \right\}$$

На підставі цих рівнянь на рис. 2.6 побудовані діаграми для активно-індуктивного (*а*) та активно-емнісного (*б*) навантажень. При побудові діаграм за вихідний вектор, як і в діаграмі холостого ходу, береться вектор основного магнітного потоку Φ . Під кутом δ до нього в бік випередження відкладається вектор струму I_0 , а під кутом 90° в бік відставання – вектор ЕРС E_1 і рівний йому вектор ЕРС E'_2 . Під кутом ψ , величина якого визначається характером зовнішнього навантаження і власних опорів вторинної обмотки, до вектора E'_2 відкладається вектор I'_2 . Вектор U'_2 знаходиться шляхом вирахування з вектора E'_2 векторів $I'_2 R'_2$ та $I'_2 X'_2$. Кут φ_2 між векторами U'_2 і I'_2 визначається характером навантаження трансформатора. Для побудови діаграми первинної обмотки трансформатора спочатку визначають струм I_1 відповідно до рівняння струмів. Після цього іншу частину діаграми будують так само, як це робиться для режиму холостого ходу. Кут φ_1 між векторами U_1 та I_1 визначає активну потужність, підведену з мережі до трансформатора.

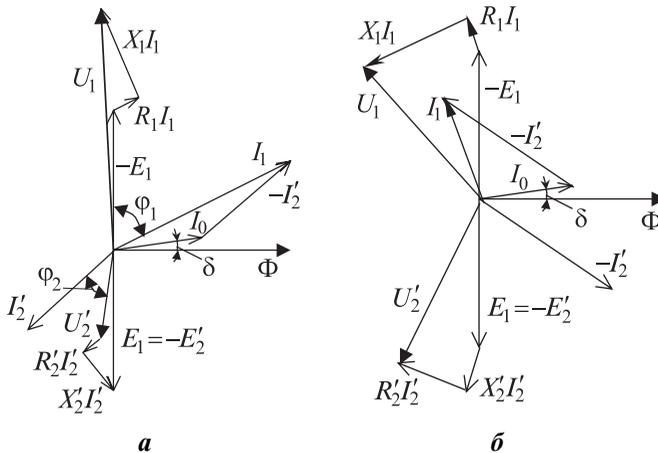


Рис. 2.6

Таким чином, при активно-індуктивному навантаженні напруга зменшується за рахунок збільшення спадання напруги у вторинній обмотці, а при активно-емнісному навантаженні вона з тих же причин підвищується.

2.5. Схема заміщення трансформатора і зміна вторинної напруги

Електрична схема, яка еквівалентна реальному навантаженому трансформатору, називається *схемою заміщення трансформатора*. Її основною цінністю є те, що вона спрощує аналіз і розрахунок усіх режимів роботи трансформатора. На рис. 2.7 зображена Т-подібна схема заміщення приведенного трансформатора. Схема складається з трьох гілок:

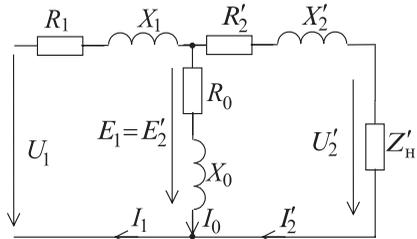


Рис. 2.7

1) первинної з параметрами R_1 і X_1 , що зображують первинну обмотку; 2) вторинної з параметрами R_2' , X_2' і $Z'_н$, перші два з яких зображують вторинну обмотку, а $Z'_н$ – навантаження трансформатора; 3) магнітної, по якій іде намагнічувальний струм I_0 , і ЕРС на її затискачах

$$-\dot{E}_1 = -\dot{E}_2 = \dot{I}_0(R_0 + jX_0) = \dot{I}_0 \underline{Z}_0,$$

де $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$ – повний опір намагнічувальної гілки, активний опір $R_0 = p_c / I_0^2$ якої обумовлюється втратами в сталі, а реактивний опір $X_0 \equiv \omega M$.

Для приведеної схеми заміщення за законами Кірхгофа можна написати наступні рівняння:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + \dot{I}_2'(R_2' + jX_2') + \dot{I}_2' \underline{Z}_н = \dot{I}_1 \underline{Z}_1 + \dot{I}_2' \underline{Z}_2' + U_2';$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + \dot{I}_0(R_0 + jX_0) = \dot{I}_1 \underline{Z}_1 + \dot{I}_0 \underline{Z}_0 = \dot{I}_1 \underline{Z}_1 - \dot{E}_1;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'.$$

На підставі цих рівнянь можна побудувати векторну діаграму схеми заміщення. При побудові даної діаграми як вихідний вектор доцільно взяти вектор $E_1 = E_2'$. Під кутом ψ до цього вектора відкладається вектор I_2' , а під кутом $90^\circ + \alpha$ – вектор I_0 . Усі інші побудови виконуються так само, як і при побудові векторної діаграми навантаженого трансформатора.

При повному навантаженні трансформатора з припустимою

похибкою намагнічувальну гілку можна не враховувати, тому що

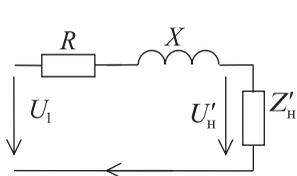


Рис. 2.8

I_0 складає невелику величину від струму I_1 , тобто вважаєть $I_1 = I'_2$. У результаті одержимо спрощену схему заміщення (рис. 2.8), у якій $R_1 + R'_2 = R$ і $X_1 + X'_2 = X$. Цією схемою можна користатися при вирішенні ряду питань, зокрема при визначенні зміни вторинної напруги.

Зміною напруги ΔU трансформатора називається алгебраїчна різниця між номінальною вторинною напругою при холостому ході U_{02} і вторинною напругою U_2 , що встановилася при заданому навантаженні і незмінному номінальному значенні первинної напруги. Ця різниця звичайно виражається у відсотках до U_{02} і називається *відносною зміною напруги*

$$\Delta U\% = \frac{U_{02} - U_2}{U_{02}} \cdot 100\%.$$

Зміна вторинної напруги при повному навантаженні силових трансформаторів коливається від одного до шести відсотків у залежності від $\cos\varphi_2$, а викликається вона зміною активного та індуктивного спадів напруг у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

Зміну вторинної напруги можна визначити дослідним шляхом, знявши зовнішню характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$ при

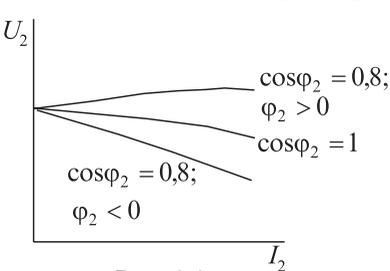


Рис. 2.9

$U_1 = \text{const}$ і $\cos\varphi_2 = \text{const}$, та аналітично. На рис. 2.9 наведені зовнішні характеристики трансформатора, що відповідають трьом різним значенням $\cos\varphi_2$ навантаження. При аналітичному визначенні ΔU звичайно користуються формулою

$$\Delta U = \beta(U_a \cos\varphi_2 + U_p \sin\varphi_2),$$

де U_a – активна складова напруги; U_p – реактивна складова напруги; $\beta = I/I_{\text{ном}} = S/S_{\text{ном}}$ – коефіцієнт навантаження; φ_2 – кут зміщення між напругою і струмом вторинного кола трансформатора.

Процентна зміна напруги визначається за виразом

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_{02}} \cdot 100 \% = \frac{U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2}{U_1} \cdot 100 \%$$

Ці вирази знаходяться з аналізу спрощеної векторної діаграми трансформатора. Вони показують, що зміна вторинної напруги зростає зі збільшенням кута φ_2 . Отже, реактивне навантаження викликає більшу зміну напруги, ніж активне. Це добре підтверджують зовнішні характеристики трансформатора.

Регулювання вторинної напруги трансформатора звичайно здійснюється зміною числа витків w_1 або w_2 , що виходить з рівняння

$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1}$. Звідси видно, що для підвищення напруги U_2 необхідно збільшити w_2 або зменшити w_1 , а для зниження – зменшити w_2 або збільшити w_1 . Для цього обмотки трансформатора мають ряд відгалужень. Регулювання напруги проводиться при відключеному трансформаторі. Для регулювання напруги під навантаженням у трансформаторах передбачається спеціальний регулювальний пристрій.

2.6. Досліди холостого ходу і короткого замикання

Досліди холостого ходу і короткого замикання проводяться для дослідження трансформаторів та визначення їх електричних величин і параметрів.

Дослід холостого ходу проводиться за схемою, наведеною на рис. 2.10,а. Замкнувши коло первинної обмотки і змінюючи напругу на її затискачах від 0 до $U_1 = 1,2U_{1\text{ном}}$, роблять заміри струму I_0 , потужності P_0 , первинної і вторинної напруг U_1 та U_2 . За одержани-

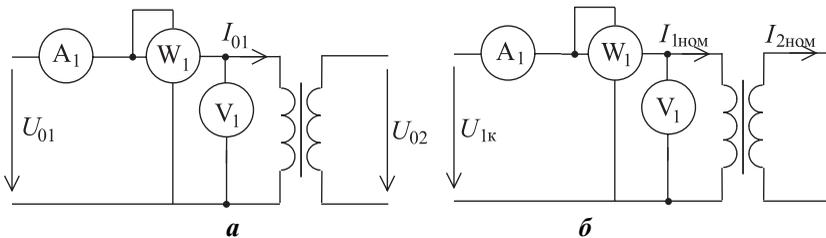


Рис. 2.10

ми даними будують залежності $I_0, P_0 = f(U_1)$, що називаються *характеристиками холостого ходу*. У деяких випадках з метою економії часу вимірюють усі величини тільки при $U_1 = U_{1\text{ном}}$, тобто при номінальному значенні первинної напруги.

За даними, що відповідають номінальній напрузі $U_{1\text{ном}}$, визначають:

а) коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{02}};$$

б) повний опір при холостому ході

$$Z_0 = \frac{\dot{U}_{1\text{ном}}}{\dot{I}_0} = R_1 + jX_1 + R_0 + jX_0 \approx R_0 + jX_0,$$

тому що

$$R_0 + jX_0 \gg R_1 + jX_1;$$

в) активний опір, обумовлений втратами в сталі трансформатора,

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0} = R_0 + R_1 \approx R_0,$$

тому що $R_0 \gg R_1$;

г) індуктивний опір холостого ходу трансформатора

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Дослід короткого замикання роблять за схемою, зображеною на рис. 2.10,б. У цьому випадку вторинна обмотка замикається, а до первинної підводиться така знижена напруга $U_{1\text{к}}$, при якій в обмотках трансформатора встановлюються номінальні струми $I_{1\text{ном}}$ та $I_{2\text{ном}}$. За цих умов знімаються показання всіх приладів.

За даними дослідження короткого замикання визначаються:

а) відносна номінальна напруга короткого замикання

$$u_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 \%,$$

що для силових трансформаторів складає 5...10 % від номінальної первинної напруги;

б) втрати короткого замикання P_k , що складаються з утрат у міді обмоток P_{M1} і P_{M2} (втрати в сталі $P_c \equiv U^2$),

$$P_k = P_{M1} + P_{M2} = I_1^2 R_k;$$

в) опір трансформатора

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_1}, \quad R_k = \frac{P_k}{I_1^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Опори $R_k = R_1 + R'_2$; $X_k = X_1 + X'_2$; $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ називають параметрами короткого замикання.

При досліді короткого замикання в схемі заміщення (рис. 2.11) $Z'_n = 0$, і, отже, рівняння електричної рівноваги в цьому випадку набувають вигляду

$$\begin{aligned} \dot{U}_k &= -\dot{E}_{1k} + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 = -\dot{E}_{1k} + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1; \\ \dot{E}'_{2k} &= \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2 = \dot{I}'_2 R'_2 + j \dot{I}'_2 X'_2; \quad \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Оскільки в приведеному трансформаторі $\dot{E}_{1k} = \dot{E}'_{2k} = \dot{I}'_2 R'_2 + j \dot{I}'_2 X'_2$, то, підставивши отримане значення \dot{E}_{1k} в рівняння (2.3), одержимо

$$\begin{aligned} \dot{U}_k &= \dot{I}_1 \underline{Z}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}'_2 = \dot{I}_1 [(R_1 + jX_1) + (R'_2 + jX'_2)] = \\ &= \dot{I}_1 [(R_1 + R'_2) + j(X_1 + X'_2)] = \dot{I}_1 (R_k + jX_k) = \dot{I}_1 \underline{Z}_k. \end{aligned} \quad (2.4)$$

За рівняннями (2.3) і (2.4) можна побудувати векторну діаграму короткого замикання приведенного трансформатора.

Відзначимо, що дослід короткого замикання звичайно проводиться в холодному стані трансформатора. При роботі ж під навантаженням він нагрівається. Тому P_k , R_k і Z_k , знайдені з досліді короткого замикання,

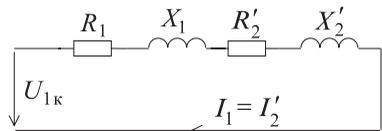


Рис. 2.11

приводяться до умовної температури 75°C за наведеними раніше формулами. Індуктивний опір X_k не залежить від температури. До температури 75°C приводиться також напруга короткого замикання.

2.7. Потужність і ККД трансформатора

Основною паспортною потужністю трансформатора є номінальна потужність $P_{\text{ном}}$, тобто потужність на затискачах вторинної обмотки, що вказується на щитку трансформатора і вимірюється у В·А або кВ·А. Крім того, характерними є вторинна і первинна потужності трансформатора.

Первинною потужністю трансформатора називається потужність, що підводиться до первинної обмотки. Первинна активна потужність однофазного трансформатора визначається за виразом

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Вторинною потужністю трансформатора називається потужність, одержувана на затискачах вторинної обмотки. Вторинна активна потужність однофазного трансформатора

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Відношення активної потужності, що віддається вторинною обмоткою, до активної первинної потужності називається *коефіцієнтом корисної дії трансформатора*

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}.$$

Потужність P_1 завжди більша від P_2 на величину втрат у трансформаторі. Ці втрати складаються з електричних утрат в обмотках і втрат у сталі. Електричні втрати в міді $P_M = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ пропорційні квадрату струму, тобто залежать від навантаження. Утрати в сталі, пропорційні $P_c \equiv U_1^2$, не залежать від навантаження, тобто вони постійні. Отже, $P_1 = P_2 + P_M + P_c \approx P_2 + \sum P$ і тоді

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_c} = 1 - \frac{P_M + P_c}{P_2 + P_M + P_c} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}. \quad (2.5)$$

Стандарт рекомендує спрощений метод визначення ККД трансформаторів за формулою

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta P_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k} \right) \cdot 100 \%, \quad (2.6)$$

де β – відношення заданого навантаження до номінального, тобто коефіцієнт завантаження трансформатора; $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВ·А; $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності вторинного кола трансформатора; P_0 – втрати холостого ходу, визначені з досліду холостого ходу, кВт; P_k – втрати короткого замикання, визначені з досліду короткого замикання, кВт.

Утрати в трансформаторі відносно малі, а ККД дуже високий і досягає у великих трансформаторів понад 99 %. ККД досягає максимального значення при $P_M = P_C$. Цю умову легко визначити, узявши першу похідну з виразу (2.5) по P_2 або з (2.6) по β і зрівнявши її до нуля. Навантаження трансформатора, за якого його ККД має максимальне значення, називається *економічним*.

2.8. Трифазні трансформатори

Трансформування енергії трифазного струму можна здійснити за допомогою трьох однофазних трансформаторів (рис. 2.12), з'єднавши їх зіркою чи трикутником у трифазну систему, або за допомогою спеціальних трифазних трансформаторів (рис. 2.13). Основними недоліками групи трансформаторів є громіздкість і велика вага системи, а недоліком трифазних – незручності транспортування,

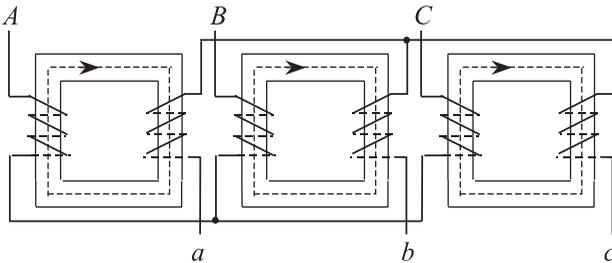


Рис. 2.12

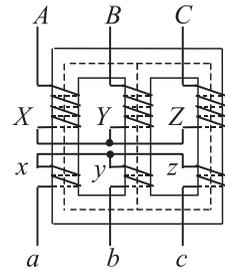


Рис. 2.13

якщо трансформатори великої потужності і, отже, великих розмірів. Тому для трансформування великих потужностей трифазного струму, як правило, застосовується група трансформаторів, а для малих і середніх – трифазні трансформатори.

Трифазні трансформатори звичайно виготовляються тристерженового типу. На кожному стержні розташовуються первинна і вторинна обмотки однієї фази. Початки обмоток вищої напруги позначаються буквами A, B і C а їх кінці – X, Y, Z . Початки обмоток нижчої напруги відповідних фаз позначаються a, b, c , а їх кінці – x, y, z . Усі ці затискачі виводяться на клемну дошку.

Первинні і вторинні обмотки трифазного трансформатора або групи трьох однофазних трансформаторів з'єднуються Y чи зіркою Y_0 , коли виведена нульова точка, або трикутником Δ . Знаходить застосування і з'єднання зигзагом Z . При позначенні з'єднань трансформаторів у чисельнику вказується з'єднання вищої сторони, а в знаменнику – нижчої.

Звичайно застосовуються дві основні групи з'єднань: Y/Y_0-12 , $Y/\Delta-11$, які наведені на рис. 2.14. Цифри 12 і 11 при умовних позначках схем указують кут зміщення фаз між векторами лінійних напруг обмоток вищої і нижчої напруг. Так, цифра 11 показує, що зміщення фаз між відповідними векторами лінійних напруг дорівнює 30° , а цифра 12 – 360° . У суднових установках, крім зазначених груп, застосовуються з'єднання $Y/Y-12$ і $\Delta/\Delta-12$.

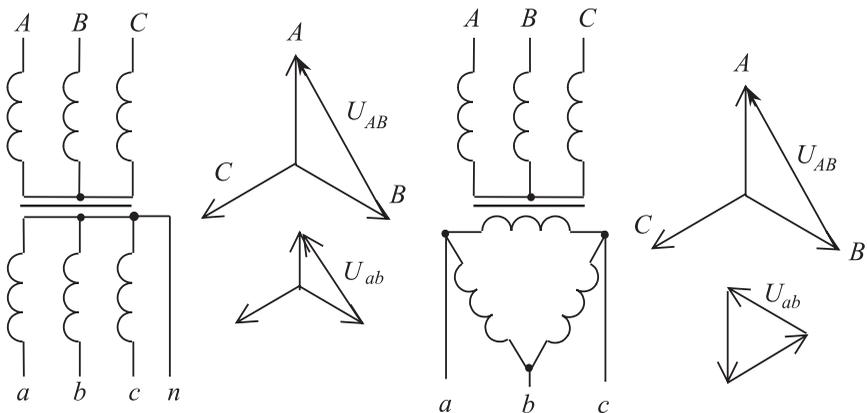


Рис. 2.14

Коефіцієнт трансформації трифазного трансформатора при з'єднаннях Y/Y і Δ/Δ визначається як відношення лінійних напруг, а при різних з'єднаннях, тобто Y/Δ та Δ/Y – як відношення фазних напруг.

Електромагнітні процеси, що відбуваються в кожній фазі трифазного трансформатора, як при холостому ході, так і при симетричному навантаженні на фази, аналогічні процесам, що відбуваються в однофазному трансформаторі. Тільки в режимі холостого ходу внаслідок несиметрії магнітної системи (магнітні опори для двох крайніх потоків Φ_1 і Φ_3 більші, ніж для середнього потоку Φ_2) має місце несиметрія струмів холостого ходу. Однак ця несиметрія не має істотного значення.

Трифазні трансформатори, як і однофазні, виготовляються масляними і сухими. Сухі трансформатори випускаються в кожусі і без кожуха.

2.9. Спеціальні типи трансформаторів

Спеціальні трансформатори дуже різноманітні. До них, зокрема, належать автотрансформатори, вимірювальні і багатообмоткові, трансформатори малої потужності, зварювальні і випрямні, обертові, трансформатори для перетворення фаз і частоти тощо.

Автотрансформатори

Автотрансформатором називається такий трансформатор, у якого обмотка нижчої напруги є частиною обмотки вищої напруги. На рис. 2.15 наведена схема автотрансформатора.

В автотрансформаторі, як і в звичайному трансформаторі, між напругами обмоток і струмами мають місце наступні співвідношення:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k},$$

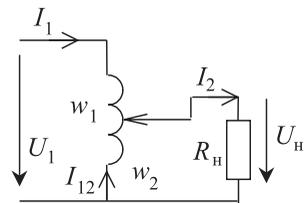


Рис. 2.15

де k – коефіцієнт трансформації; U_1, I_1, w_1 – напруга, струм і число витків первинної обмотки; U_2, I_2, w_2 – напруга, струм і число витків вторинної обмотки.

Режим холостого ходу автотрансформатора аналогічний режиму холостого ходу звичайного трансформатора. У роботі ж автотрансформатора під навантаженням є принципова різниця в порівнянні зі звичайним трансформатором. По-перше, струм загальної частини обмотки w_2 становить різницю первинного і вторинного струмів, тобто

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1;$$

по-друге, підведена до автотрансформатора потужність $P_1 = U_1 \dot{I}_1$ передається у вторинну обмотку частково електромагнітним шляхом і частково електричним, тому що обидві обмотки електрично зв'язані.

Дійсно, з огляду на те, що струми \dot{I}_1 та \dot{I}_2 за фазою майже взаємно протилежні, перепишемо рівняння у вигляді $\dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_{12}$ і, помноживши обидві частини його на U_2 , одержимо

$$S = \dot{U}_2 \dot{I}_2^* = \dot{U}_2 \dot{I}_1^* + \dot{U}_2 \dot{I}_{12}^* = \dot{P}_e + \dot{P}_{em},$$

де S – повна потужність, передана автотрансформатором у вторинне коло; P_e – потужність, передана у вторинне коло електричним шляхом; P_{em} – потужність, передана у вторинне коло електромагнітним шляхом.

Якщо струми \dot{I}_1 та \dot{I}_{12} виразити через коефіцієнт трансформації та \dot{I}_2 , тобто $\dot{I}_1 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$ та $\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right)$, то одержимо

$$S = P_e + P_{em} = \frac{1}{k} S + \left(1 - \frac{1}{k}\right) S.$$

Звідси виходить, що при збільшенні коефіцієнта трансформації потужність P_e зменшується, а P_{em} збільшується. Отже, при великих k різниця між автотрансформатором і трансформатором згладжується. Крім того, при великих коефіцієнтах трансформації k споживачів, що живляться від автотрансформатора, необхідно захищати від перенапруги. Це також робить їх небезпечними під час обслуговування внаслідок прямого з'єднання вторинного і первинного кіл. Тому автотрансформатори звичайно виготовляються з $k = 1,25 \dots 2$.

За цих умов ККД автотрансформаторів вищий, ніж у звичайних трансформаторів.

Автотрансформатори можуть бути підвищувальними і знижувальними, однофазними й трифазними. Вони застосовуються для пуску асинхронних і синхронних електродвигунів, у високовольтних лініях електропередачі та регулювання вторинної напруги. Здійснюється регулювання напруги за допомогою перемикача, що змінює число витків вторинного кола, або за допомогою ковзного струмоприймача. За таким принципом, зокрема, влаштовані лабораторні автотрансформатори ЛАТРи.

Вимірювальні трансформатори

Трансформатори, що призначені для розширення меж виміру електровимірювальних приладів, називаються *вимірювальними трансформаторами*. Вони поділяються на трансформатори струму і трансформатори напруги.

Трансформатори струму застосовуються для вмикання амперметрів, струмових котушок ватметрів, лічильників і різних реле. На рис. 2.16 показана схема вмикання амперметра через трансформатор струму, який складається із сердечника, первинної і вторинної обмоток. Первинна обмотка трансформатора струму звичайно має невелике число витків і включається послідовно в коло, струм якого вимірюється. Вторинна обмотка має більше число витків і замикається на вимірювальні прилади. Номінальний струм вторинної обмотки завжди встановлюється 5 А, а первинний визначається співвідношенням

$$I_1 = \frac{w_1}{w_2} I_2 = k I_2.$$

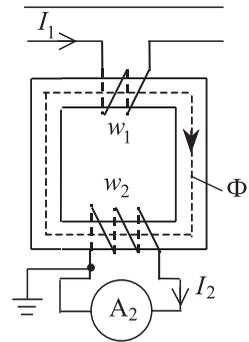


Рис. 2.16

Оскільки опір амперметрів і струмових котушок інших приладів звичайно малий, трансформатор струму практично працює в режимі короткого замикання. Якщо під час роботи трансформатора струму розімкнути його вторинну обмотку, то струм у ній стане рівним нулю, а струм у первинному колі залишиться без зміни. У результаті магнітний потік трансформатора різко збільшиться, що

викликає неприпустимий його перегрів. Крім того, ЕРС вторинної обмотки зростає пропорційно магнітному потоку і досягне значень, небезпечних для обслуговуючого персоналу. Тому не можна розмикати вторинне коло працюючого трансформатора струму. Якщо ж потрібно від'єднати від нього проводи, то попередньо необхідно замкнути обмотку.

Різновидом трансформатора струму є так звані *вимірювальні кліщі*, що мають одну вторинну обмотку, замкнену на амперметр, і розімкнений сердечник, яким охоплюється провід з вимірюваним струмом. Сердечник виконує роль первинної обмотки трансформатора.

Трансформатори напруги застосовуються для виміру високих напруг і являють собою звичайні трансформатори невеликої потужності. На рис. 2.17 зображена схема вмикання вольтметра через трансформатор напруги. Первинна обмотка має велике число витків і підключається до мережі, напруга якої вимірюється. Вторинна обмотка має невелике число витків і замикається на вольтметр або струмову котушку інших приладів. Номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора звичайно встановлюється 110 В, а величина первинної напруги визначається формулою

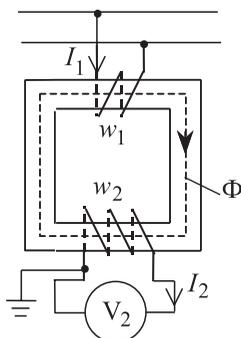


Рис. 2.17

$$U_1 = kU_2 .$$

Оскільки опір вольтметра і струмових котушок інших приладів порівняно великий, трансформатор напруги практично працює в режимі холостого ходу.

З метою безпеки один із затискачів вторинної обмотки і кожух вимірювальних трансформаторів заземлюються.

Зварювальні трансформатори

Залежно від виду зварювання – дугове або контактне – зварювальні трансформатори мають різні характеристики і конструктивне виконання. Найбільш розповсюдженими є зварювальні трансформатори для дугового зварювання. Вони являють собою однофазні знижувальні трансформатори *I* (рис. 2.18,*а*), обладнані реактивною

котушкою 2 з розсувним сердечником для регулювання величини зварювального струму. Трансформатори звичайно працюють у режимі, близькому до короткого замикання. Змінюючи величину повітряного зазору сердечника, можна плавно змінювати величину індуктивного опору котушки 1 і, отже, величину зварювального струму. Зварювальні трансформатори мають крутопадаючу зовнішню характеристику (див. рис. 2.18,б).

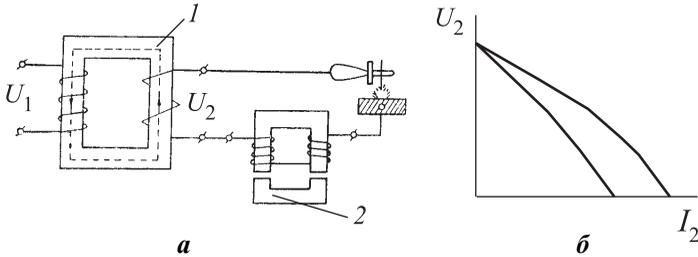


Рис. 2.18

Приклад 2.1. Однофазний трансформатор ОМ-6667/35 працює як знижувальний. Використовуючи його технічні дані, що наведені в табл. 2.1, розрахувати: коефіцієнт трансформації; номінальні струми первинної і вторинної обмоток; напругу на вторинній обмотці U_2 при активно-індуктивному навантаженні, що складає 50 % ($\beta=0,5$) від номінального, і $\cos \varphi = 0,8$; ККД при $\cos \varphi_2 = 0,9$ і навантаженні, що складає 75 % ($\beta=0,75$) від номінального; річний ККД, якщо з повним навантаженням при $\cos \varphi_2 = 0,8$ трансформатор працює 7000 год.

Таблиця 2.1

Тип трансформатора	$S_{\text{ном}}$, кВ·А	$U_{1\text{ном}}$	$U_{2\text{ном}}$	P_0	$P_{\text{к}}$	$U_{\text{к}}$	I_0
		кВ		кВт		%	
ОМ-6667/35	6667	35	10	17	53,5	8	3
ТС-180/10	180	10	0,525	1,6	3,0	5,5	4

Розв'язання. Коефіцієнтом трансформації k називається відношення вищої напруги до нижчої в режимі холостого ходу, незалежно від того, який трансформатор – підвищувальний або знижувальний:

$$k = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}} = 35 / 10 = 3,5.$$

Номинальні струми первинної і вторинної обмоток визначимо за формулою номінальної потужності трансформатора:

$$S_{\text{НОМ}} = U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}} \approx U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}};$$

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{1\text{НОМ}} = 6667 / 35 = 190,5 \text{ А};$$

$$I_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{2\text{НОМ}} = 6667 / 10 = 666,7 \text{ А}.$$

Активно-індуктивне навантаження трансформатора приводить до зниження напруги на вторинній обмотці U_2 , яку можна визначити за формулою процентної зміни напруги (у трансформаторах ΔU не перевищує 1...6 %)

$$\Delta U = [(U_{2\text{НОМ}} - U_2) / U_{2\text{НОМ}}] \cdot 100 \approx \beta (U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2) = 2,7 \%,$$

де $\beta = I / I_{\text{НОМ}} = S / S_{\text{НОМ}}$ – коефіцієнт навантаження; U_a і U_p – активна і реактивна складові напруги короткого замикання, виражені у відсотках;

$$U_a = (P_{\text{к.а}} / S_{\text{НОМ}}) \cdot 100 = (53,5 / 6667) \cdot 100 = 0,8 \%;$$

$$U_p = \sqrt{U_{\text{к}}^2 - U_a^2} = \sqrt{8^2 - 0,8^2} = 7,95 \%;$$

$$U_2 = U_{2\text{НОМ}} [1 - (\Delta U / 100)] = 10000 [1 - 0,0271] = 9730 \text{ В}.$$

ККД трансформатора

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_1 - (P_0 + \beta^2 P_{\text{к}})}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}{P_1} = \\ &= \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(1 - \frac{1 + 0,75^2 \cdot 53,5}{0,75 \cdot 6667 \cdot 0,9 + 17 + 0,75^2 \cdot 53,5} \right) \cdot 100 = 99 \%, \end{aligned}$$

де P_0 – потужність утрат при холостому ході, що дорівнює сумі втрат у сталі на гістерезис і вихрові струми; $P_{\text{к}}$ – потужність утрат в обмо-

тках при короткому замиканні (при навантаженні, відмінному від номінального, потужність утрат в обмотках $P_c = \beta^2 P_K$).

У сучасних трансформаторах, особливо потужних, при номінальному навантаженні η дорівнює 98...99 %.

Річний ККД $\eta_{\text{річ}}$ враховує роботу трансформатора в різних режимах. При цьому потужність утрат у сталі враховується протягом усього року – $T_0 = 365 \cdot 24 = 8760$ год, якщо не зазначено, що трансформатор відключається зі сторони первинної обмотки; потужності втрат у провідниках обмоток $P_{\text{пр}}$ враховуються тільки під час роботи під навантаженням і пропорційні β^2 .

Отже,

$$\begin{aligned} \eta_{\text{річ}} &= \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 \cdot T \cdot 100}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 \cdot T + P_0 T_0 + \beta^2 P_K T} = \\ &= \left(1 - \frac{P_0 T_0 + \beta^2 P_K T}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 \cdot T + P_0 T_0 + \beta^2 P_K T} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(1 - \frac{17 \cdot 8760 + 1^2 \cdot 53,5 \cdot 7000}{1 \cdot 6667 \cdot 0,8 \cdot 7000 + 17 \cdot 8760 + 1^2 \cdot 53,5 \cdot 7000} \right) \cdot 100 = 98,6 \%. \end{aligned}$$

Приклад 2.2. Трифазний трансформатор ТС-180/10 підключений до мережі напругою 10000 В.

Використовуючи дані, що зазначені в паспорті (див. табл. 2.1), розрахувати: фазні напруги, якщо група з'єднання трансформатора $Y/\Delta - 11$; фазний і лінійний коефіцієнти трансформації; номінальні струми первинної і вторинної обмоток; активні опори обмоток, якщо при короткому замиканні трансформатора потужності первинної і вторинної обмоток рівні; напругу вторинної обмотки при активно-індуктивному навантаженні, що складає 75 % від номінального ($\beta = 0,75$), і $\cos \varphi_2 = 0,9$; ККД при навантаженні, що складає 50 % ($\beta = 0,5$) від номінального, і $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Розв'язання. У трансформатора ТС-180/10 первинна обмотка з'єднана в зірку, а вторинна – у трикутник, тому фазні напруги

$$U_{1\phi} = U_{\text{НОМ}} / \sqrt{3} = 10000 / 1,73 = 5780 \text{ В}; \quad U_{2\phi} = U_{\text{НОМ}} = 525 \text{ В}.$$

Фазний і лінійний коефіцієнти трансформації:

$$k_{\phi} = U_{1\phi} / U_{2\phi} = 5780 / 525 \approx 11; \quad k_L = U_{1\text{НОМ}} / U_{2\text{НОМ}} = 10000 / 525 \approx 19.$$

Номинальні струми первинної і вторинної обмоток визначимо за формулою номінальної потужності трансформатора

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}},$$

звідки

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} U_{1\text{НОМ}}) = 180 / (1,73 \cdot 10) = 10,4 \text{ А};$$

$$I_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} U_{2\text{НОМ}}) = 180 / (1,73 \cdot 0,525) = 198 \text{ А}.$$

Знаходимо активні опори обмоток R_1 і R_2 з урахуванням того, що в кожній обмотці трансформатора в трьох фазах струм короткого замикання I_K дорівнює номінальному струму $I_{1\text{НОМ}}$:

$$R_1 = \frac{P_K}{2 \cdot 3 I_{1К.З}^2} = \frac{P_K}{2 \cdot 3 I_{1\text{НОМ}}^2} = \frac{3000}{6 \cdot 10,4^2} = 4,62 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{P_K}{2 \cdot 3 I_{2\phi}^2} = \frac{3000}{6 \cdot 114,4^2} = 0,038 \text{ Ом},$$

де $I_{2\phi} = I_{2\text{НОМ}} / \sqrt{3} = 19 / 1,73 = 114,4 \text{ А}$.

Напругу на вторинній обмотці навантаженого трифазного трансформатора визначають так само, як у прикладі 2.1:

$$\Delta U = \beta (U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2) = 0,75 (1,67 \cdot 0,9 + 5,24 \cdot 0,436) = 2,84 \text{ \%},$$

де

$$U_a = (P_K / S_{\text{НОМ}}) \cdot 100 = (3 / 180) \cdot 100 = 1,67 \text{ \%};$$

$$U_p = \sqrt{U_K^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,67^2} = 5,24 \text{ \%}.$$

У свою чергу, $S_{\text{НОМ}}$ – це потужність усіх трьох фаз, а P_K – потужність утрат у трьох фазах, що вказана в паспорті.

Отже,

$$U_2 = U_{2\text{ном}} (1 - \Delta U / 100) = 525(1 - 0,0284) = 510 \text{ В.}$$

ККД трансформатора

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 \cdot 100}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}} = \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(1 - \frac{1,6 + 0,5^2 \cdot 3}{0,5 \cdot 180 \cdot 0,8 + 1,6 + 0,5^2 \cdot 3} \right) \cdot 100 = 97 \%. \end{aligned}$$

Приклад 2.3. В однофазному трансформаторі визначити: ЕРС, яка індукується в одному витку; ЕРС первинної і вторинної обмоток та коефіцієнт трансформації, якщо переріз сталі сердечника $S_c = 8 \text{ см}^2$, максимальна магнітна індукція в ньому $B_m = 1 \text{ Тл}$, частота мережі $f = 50 \text{ Гц}$, число витків $w_1 = 800$ і $w_2 = 100$.

Розв'язання. Максимальний магнітний потік у сердечнику

$$\Phi_m = B_m S_c = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Діюче значення ЕРС, що індукується в одному витку,

$$E_B = 4,44 f \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 0,178 \text{ В.}$$

Діючі значення ЕРС первинної і вторинної обмоток

$$E_1 = E_B w_1 = 0,178 \cdot 800 = 142,4 \text{ В;}$$

$$E_2 = E_B w_2 = 0,178 \cdot 100 = 17,8 \text{ В.}$$

Коефіцієнт трансформації

$$k = w_1 / w_2 = E_1 / E_2 = 800 / 100 = 8.$$

3. АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ ДВИГУНИ

3.1. Загальні відомості й основні поняття

Електричні машини змінного струму, швидкість обертання яких змінюється зі зміною навантаження на їхньому валу, називаються *асинхронними машинами*. Вони, як і всі інші електричні машини, оборотні, тобто можуть працювати як генератори та електродвигуни. Асинхронні машини можуть працювати також як гальма. Однак у техніці їх застосовують головним чином у ролі електродвигунів.

Асинхронні електродвигуни поділяються за числом фаз на однофазні, двофазні і трифазні, котрі широко застосовуються.

Трифазний асинхронний електродвигун винайшов у 1889 році М.О. Доливо-Добровольський.

Завдяки простоті пристрою, високій надійності в експлуатації і меншій вартості в порівнянні з іншими двигунами асинхронні двигуни трифазного струму знайшли широке застосування в промисловості та сільському господарстві. З їхньою допомогою приводяться в рух на суднах шпилі, брашпилі, металорізальні і деревообробні верстати, піднімальні крани, лебідки, ліфти, ескалатори, насоси, вентилятори й інші механізми.

3.2. Будова і принцип дії трифазних асинхронних електродвигунів

Трифазні асинхронні електродвигуни складаються з двох основних частин: нерухомої (*статора*) й обертової (*ротора*). За формою виконання ротора вони розділяються на два основні типи: електродвигуни з короткозамкненим ротором (короткозамкнені електродвигуни) та електродвигуни з фазним ротором (фазні електродвигуни). Статори обох типів трифазних асинхронних електродвигунів нічим не відрізняються один від одного, тоді як між роторами є значна різниця.

На рис. 3.1 зображені подовжній (*а*) і поперечний (*б, в*) розрізи асинхронного двигуна трифазного струму.

Статор складається з корпусу *1*, що являє собою основу всього двигуна. Він повинен мати достатню механічну міцність і виготовляється зі сталі, чавуну чи алюмінію. За допомогою лап *8* двигун кріпиться до фундаменту чи безпосередньо до станини виробничого

механізму. Існує й інший спосіб кріплення двигуна до виробничого механізму – на фланцях.

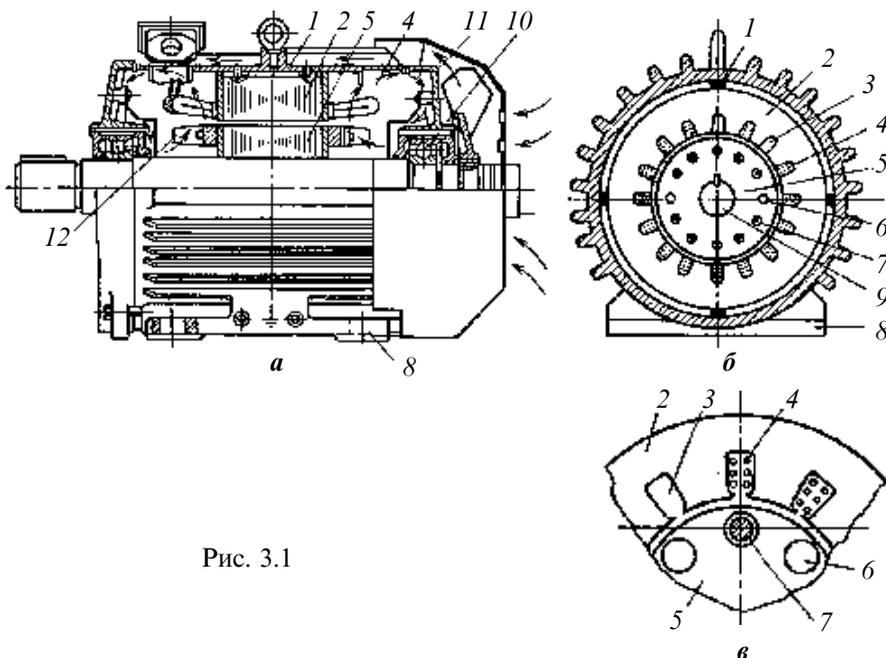


Рис. 3.1

У корпус 1 умонтований сердечник 2 статора, що являє собою порожнистий циліндр, на внутрішній поверхні якого є пази 3 з обмоткою статора 4. Оскільки в сердечнику статора змінний магнітний потік і на статор діє момент, що розвивається двигуном, сердечник повинен виготовлятися з феромагнітного матеріалу достатньої механічної міцності. Для зменшення втрат від вихрових струмів сердечник статора збирають з окремих пластин (товщиною 0,35...0,5 мм) електротехнічної сталі і кожен лист ізолюють лаком чи іншим ізоляційним матеріалом.

Обмотка статора 4 виготовляється з ізолюваного мідного проводу круглого чи прямокутного перерізу, рідше – з алюмінієвого проводу. Для ізоляції проводів один від одного використовують папір і бавовняну тканину, просочені різними лаками, слюдою, скловолоконно та різні емалі. Для ізоляції проводів обмотки від сердечника статора призначені електроізоляційний картон, слюда, азбест, скловолоконно.

Обмотка статора виготовляється з трьох окремих частин, названих фазами. Фази можуть бути з'єднані між собою зіркою чи трикутником. Початок обмоток будемо позначати на схемах буквами A , B і C , кінці – X , Y , Z . Обмотки двигунів малої і середньої потужностей виготовляють на напруги 380/220 та 220/127 В. Напруга, зазначена в чисельнику, відповідає з'єднанню обмоток зіркою, у знаменнику – трикутником. Таким чином, той самий двигун при відповідній схемі з'єднання його обмоток може бути ввімкнений у мережу на будь-яку зазначену в паспорті напругу. Існують двигуни на 500, 660 і 1140 В.

Двигуни високої напруги виготовляють на напруги 3000 і 6000 В.

На корпусі двигуна є щиток із затискачами, за допомогою яких обмотка приєднується до трифазної мережі. До кожного затискача підключений відповідний вивід обмотки. Затискачі, до яких підключені початки обмоток, позначають літерами $C1$, $C2$ і $C3$, кінці обмоток – відповідно $C4$, $C5$ і $C6$.

Сердечник 5 ротора (див. рис. 3.1) являє собою циліндр, зібраний, так само як і сердечник статора, з окремих листів електротехнічної сталі, у якому є пази 6 з обмоткою 7 ротора.

Ротор будь-якого асинхронного електродвигуна складається з осердя й обмотки. Осердя набирається зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм, і в його пази вкладається обмотка. У залежності від виконання обмотки ротори асинхронних двигунів виготовляються двох типів – короткозамкнені (рис. 3.2,*а*) і фазні (рис. 3.3).

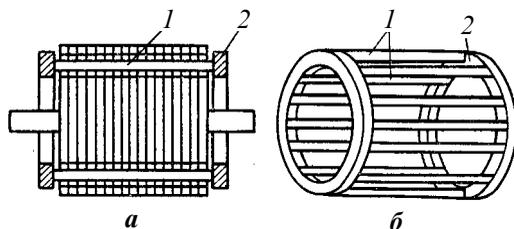


Рис. 3.2

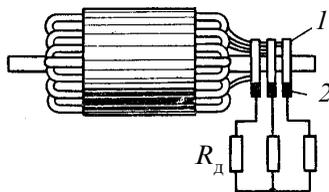


Рис. 3.3

Обмотка короткозамкненого ротора (див. рис. 3.2,*б*) робиться з латунних стержнів, що закладаються в пази ротора. Торці стержнів з'єднуються кільцями. Така обмотка називається *білячою кліткою*.

У деяких конструкціях короткозамкнених роторів обмотка робиться з алюмінію, що заливається безпосередньо в пази ротора. Крім того, зустрічаються ще короткозамкнені ротори з глибоким пазом і ротори з подвійною білячою кліткою. Обидві ці форми виконання роторів мають мету поліпшити умови пуску.

Обмотка фазного ротора (див. рис. 3.3) виконується подібно обмотці статора у вигляді трьох фазних обмоток, з'єднаних зіркою. Три вільні кінці фазних обмоток приєднуються до трьох кілець 1 , що називаються *контактними*. Ці кільця укріплені на валу ротора й ізольовані одне від одного і від вала. У зібраному електродвигуні до контактних кілець притискаються щітки 2 , що з'єднуються далі з пусковим (або додатковим регулювальним) реостатом R_d . Крім того, ці електродвигуни мають пристрої для замикання накоротко обмотки ротора після пуску.

Вал ротора 9 (див. рис. 3.1) виготовлений зі сталі й обертається в кулькових чи роликівих підшипниках 10 . Підшипники закріплені в підшипникових щитах 11 , що виготовлені з чавуну або сталі і прикріплюються до корпусу болтами.

Принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна заснований на взаємодії обертового магнітного поля статора зі струмами, що наводяться цим полем в обмотці ротора. Дійсно, якщо обмотки статора з'єднати зіркою чи трикутником і пропустити через них трифазний струм (рис. 3.4), то всередині статора виникне обертове магнітне поле, частота обертання якого, як встановлено раніше, $n_1 = 60f/p$. Це поле буде наводити в обмотці ротора ЕРС, під впливом якої в провідниках обмотки ротора виникнуть струми. Від взаємодії цих струмів з обертовим полем статора ротор починає обертатися в бік обертання поля. Однак швидкість обертання ротора n_2 завжди менша від швидкості поля, тому що при $n_2 = n_1$ будуть індукуватися струми в обмотці ротора і, отже, ротор не буде обертатися. Швидкість поля n_1 називається *синхронною*, швидкість ротора n_2 – *асинхронною*. Відставання ротора від поля статора ха-

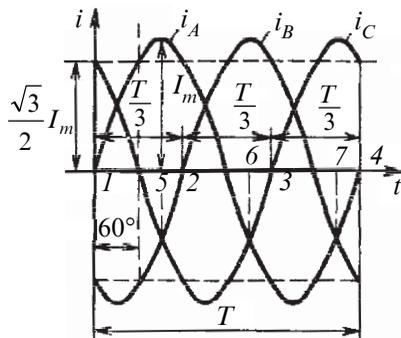


Рис. 3.4

рактизується так званим *ковзанням*

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

З цього рівняння визначиться частота обертання ротора

$$n_2 = (1 - s)n_1.$$

Ковзання, що відповідає номінальному навантаженню електродвигуна, називається *номінальним ковзанням*. В асинхронних електродвигунів нормального виконання воно звичайно становить 0,06...0,01 (6...1 %) у залежності від потужності електродвигуна. Тому частота обертання ротора асинхронних електродвигунів мало відрізняється від частоти обертання поля статора. Так, наприклад, якщо $n_1 = 1500$ об/хв і $s = 3,6\%$, то частота обертання ротора асинхронного двигуна

$$n_2 = (1 - 0,036) \cdot 1500 = 1450 \text{ об/хв.}$$

Відставання ротора від поля статора (іншими словами, несинхронне обертання ротора з полем статора) і визначило назву асинхронного електродвигуна.

3.3. Процеси, що проходять у нерухомому роторі

Обмотка ротора не має електричного зв'язку з обмоткою статора. Між ними існує тільки магнітний зв'язок, і енергія з однієї обмотки передається в іншу за допомогою магнітного поля. У цьому відношенні асинхронний двигун подібний трансформатору, у якому обмотка статора є первинною, а обмотка ротора – вторинною.

При нерухомому роторі в обмотках статора і ротора індукуються ЕРС

$$E_1 = 4,44 f w_1 k_1 \Phi_m; E_2 = 4,44 f w_2 k_2 \Phi_m,$$

де f – частота напруги мережі; w_1 і w_2 – число витків в обмотках статора та ротора; k_1 і k_2 – обмоткові коефіцієнти, що враховують просторове розміщення обмоток (як правило, мають величину 0,9...0,92); Φ_m – амплітуда обертового магнітного потоку.

Напруга, що підведена до статора і зрівноважує ЕРС та спад напруги в обмотці,

$$\dot{U} = -\dot{E} + \underline{Z}_1 \dot{I}_1.$$

Струм статора

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U} + \dot{E}_1}{\underline{Z}_1},$$

де $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ – повний комплексний опір фази обмотки статора.

Струм ротора

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}_2},$$

де $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ – повний комплексний опір фази обмотки ротора.

3.4. Процеси, що проходять у рухомому роторі

Магнітний потік статора перетинає обертовий ротор з частотою

$$n_s = n_1 - n_2,$$

а частота струму в роторі

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = sf.$$

ЕРС у рухомому роторі

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 k_2 \Phi_m = 4,44 sf w_2 k_2 \Phi_m = sE_2,$$

де E_2 – ЕРС, що індукується в обмотці нерухомого ротора.

Струм у рухомому роторі

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}},$$

де $X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f L_2 = sX_2$ – індуктивний опір фази рухомого ротора.

Перетворимо струм у рухомому роторі:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X^2}}$$

або в зведених величинах

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X')^2}},$$

де R'_2/s – еквівалентний зведений опір обмотки ротора, який зі зростанням навантаження зменшується, що спричиняє збільшення потужності, споживаної двигуном.

Під час розкручування ротора ковзання зменшується, наближаючись до нуля, струм у роторі також зменшується.

Кут зміщення фаз між струмом і ЕРС ротора

$$\operatorname{tg}\psi_2 = \frac{X_{2s}}{R_2} = \frac{sX_2}{R_2}$$

або

$$\cos\psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} = \frac{\frac{R_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}.$$

3.5. Обертаючий момент трифазних асинхронних електродвигунів

Електрична потужність, що підводиться до статора асинхронного електродвигуна, перетворюється в механічну потужність на валу і частково втрачається в машині. Цей процес перетворення показано на *енергетичній діаграмі* (рис. 3.5). Остання зображена у вигляді потоку енергії, що рухається, починаючи з потужності, підведеної до статора, закінчується корисною потужністю на валу електродвигуна.

Потужність, що підведена до статора електродвигуна, визначається формулою

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi,$$

де U_1, I_1 – фазні величини напруги і струму; U, I – лінійні значення напруги і струму; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електродвигуна.

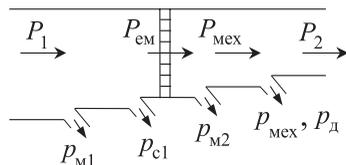


Рис. 3.5

Частина цієї потужності втрачається в статорі електродвигуна у вигляді втрат у сталі p_{c1} і втрат у міді p_{M1} . Інша ж (більша) частина підведеної до статора потужності електромагнітним шляхом передається ротору. Ця потужність називається *електромагнітною* і визначається формулою

$$P_{ем} = P_1 - p_{M1} - p_{c1}.$$

Частина електромагнітної потужності втрачається в роторі у вигляді втрат у міді p_{M2} , а інша частина перетворюється в механічну, тобто

$$P_{мех} = P_{ем} - p_{M2}.$$

У робочому режимі втрати в міді ротора p_{M2} (електричні втрати) набагато більші, ніж утрати в сталі ротора p_{c2} (магнітні втрати):

$$p_{M2} \gg p_{c2},$$

тому можна записати

$$p_{M2} = s P_{ем}.$$

Крім того, у роторі є механічні втрати $p_{мех}$ і додаткові p_d . Отже, корисна потужність на валу асинхронного електродвигуна

$$P_2 = P_{мех} - p_{мех} - p_d.$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Номінальний ККД сучасних асинхронних двигунів дорівнює 0,75...0,95.

Процес перетворення електричної потужності в механічну обумовлюється виникненням в асинхронному електродвигуні обертаючого моменту. Останній є однією з найважливіших характеристик електродвигуна. Виведемо вираз для обертаючого моменту і розглянемо механічну характеристику асинхронного електродвигуна.

Очевидно, що обертаючий момент електродвигуна може бути визначений за величиною електромагнітної потужності, переданої ротору електродвигуна, якщо вважати, що вона цілком перетвориться в механічну. Дійсно, електромагнітна потужність електродвигуна в момент його пуску в хід, коли $n_2 = 0$, може бути виражена формулою

$$P_{\text{ем}} = 3E_2 I_2 \cos \psi_2, \quad (3.1)$$

де E_2, I_2 – ЕРС і струм фази нерухомого ротора; ψ_2 – кут зміщення між ЕРС і струмом фази ротора.

З іншого боку, електромагнітна потужність ЕРС може бути виражена добутком обертаючого моменту на кутову швидкість обертового магнітного потоку ω_1 , тобто

$$P_{\text{ем}} = M\omega_1. \quad (3.2)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (3.1) і (3.2), одержуємо

$$M\omega_1 = 3E_2 I_2 \cos \psi_2,$$

звідки

$$M = \frac{3E_2 I_2}{\omega_1} \cos \psi_2.$$

Замінивши в цьому виразі E_2 його значенням $4,44w_2 k_{02} f_1 \Phi_m$, а також з огляду на те, що

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p},$$

одержимо

$$M = \frac{3 \cdot 4,44 w_2 k_{02} f_1 \Phi_m}{2\pi f_1} I_2 \cos \psi_2 = c \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

p

де c – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних елементів електродвигуна.

Це рівняння показує, що обертаючий момент даного асинхронного електродвигуна пропорційний обертовому магнітному потоку Φ_m та активній складовій струму ротора $I_2 \cos \psi_2$, тобто процес перетворення електричної потужності в механічну характеризується активною потужністю.

Обертаючий електромагнітний момент двигуна можна записати так:

$$M = c \Phi_m \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_2)^2}} \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_2)^2}} = c \Phi_m \frac{E_2 R_2}{\frac{R_2^2}{s} + s X_2^2}.$$

Залежність моменту M на валу від ковзання s або від частоти обертання ротора n_2 при постійній напрузі живлення та частоті струму називається *механічною характеристикою*.

Механічна характеристика $M(s)$ асинхронного двигуна, побудована з урахуванням зміни ковзання s від 1 до 0, наведена на рис. 3.6.

Виділяють три моменти: номінальний $M_{\text{ном}}$, максимальний (або критичний) $M_{\text{мах}}$, пусковий $M_{\text{пуск}}$, а також відповідні цим моментам ковзання $s_{\text{ном}}$, $s_{\text{кр}}$ (критичне), $s_{\text{пуск}}$.

Величини ковзання $s_{\text{ном}} = 0,02 \dots 0,05$; $s_{\text{кр}} = 0,1 \dots 0,15$; $s_{\text{пуск}} = 1$.

В асинхронних двигунів, як правило, $M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}} = \lambda = 1,7 \dots 2,2$; $M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} = 1,0 \dots 2,0$.

Відношення $\lambda = M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}}$ називається перевантажувальною здатністю.

Максимальний обертаючий момент розбиває криву $M(s)$ на дві ділянки: OA і AB . Ділянка OA – стійкий режим: зі збільшенням мо-

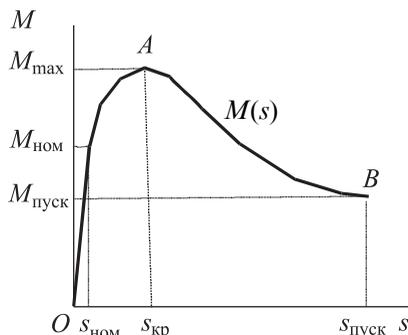


Рис. 3.6

менту навантаження частота обертання ротора сповільнюється, ковзання збільшується, зростає обертаючий момент. Нове положення рівноваги досягається, коли обертаючий момент стає рівним гальмівному. При цьому ротор двигуна стійко обертається зі зменшеною швидкістю. Ділянка *AB* відповідає нестійкому режиму роботи: зі збільшенням моменту *M* навантаження збільшується, обертаючий момент зменшується, ковзання зростає ще більше, двигун зупиняється і починає швидко нагріватися, тому що при *s*=1 його струм у шість-сім разів перевищує номінальний.

Механічну характеристику можна побудувати за рівнянням Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

де критичне ковзання, що відповідає максимальному моменту,

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right),$$

номінальне ковзання

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1}.$$

3.6. Робочі характеристики двигуна

$$\frac{I_1}{I_{\text{ном}}}; \frac{M}{M_{\text{ном}}}; \frac{\Omega_2}{\Omega_0}; \eta; \cos \varphi$$

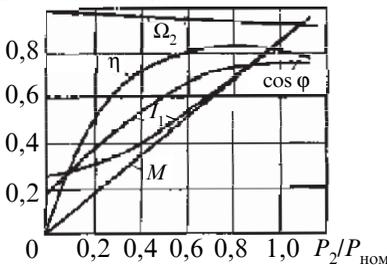


Рис. 3.7

Робочі характеристики асинхронного двигуна (рис. 3.7) показують залежність його експлуатаційних параметрів від потужності навантаження на валу P_2 ; до цих параметрів відносять струм і активну потужність, ККД, швидкість ротора та коефіцієнт потужності двигуна.

При холостому ході $P_2 = 0$, струми статора I_{01} створюють обертове поле. Відношення $I_{01}/I_{\text{ном}}$ в

асинхронного двигуна досить велике і складає 30...50 %, тому що повітряний зазор істотно збільшує опір магнітного кола. Унаслідок утрат у магнітопроводі і вентиляційних у двигуні при холостому ході $\cos \varphi_{01} = 0,1 \dots 0,2$. Частота обертання ротора $n_2 = (0,995 \dots 0,998)n_1$. На рис. 3.7 швидкості обертання магнітного поля і ротора – Ω_0 та Ω_2 .

У міру зростання навантаження на валу струм статора збільшується, тому що відбувається компенсація дії розмагнічувального струму ротора. При збільшенні навантаження на валу зростає активна складова струму I_2 , що викликає відповідне зростання активної складової струму I_1 . У свою чергу, збільшується $\cos \varphi_1 = P_1 / \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$. Природно, що швидкість двигуна зменшується, оскільки це єдина причина збільшення струму I_2 й обертаючого електромагнітного моменту. При навантаженнях, близьких до номінального, зростання ККД сповільнюється; більш того, він може трохи падати внаслідок збільшення втрат в обмотках машини.

Аналогічний характер має крива коефіцієнта потужності, але причина спаду $\cos \varphi_1$ при великому навантаженні має іншу природу. Зі зростанням навантаження збільшуються струми I_2 й I_1 і підсилюються поля розсіювання. Тому збільшується реактивна потужність Q_1 , пов'язана з обміном енергією між полями розсіювання і живильною мережею. При номінальному навантаженні ККД двигуна $\eta = 0,92 \dots 0,96$, а $\cos \varphi_1 = 0,7 \dots 0,9$.

3.7. Пуск у хід асинхронних електродвигунів

Основними величинами, що визначають способи пуску в хід асинхронних електродвигунів, є величини пускового моменту і пускового струму. Дійсно, для того, щоб асинхронний електродвигун рушив з місця і розвив швидкість до сталого значення, пусковий момент повинен бути більший від моменту опору. У загальному випадку, тобто при пуску електродвигуна під навантаженням, пусковий момент може бути виражений формулою

$$M_{\text{пуск}} = M_0 + M_{\text{н}} + M_j,$$

де M_0 – момент холостого ходу; $M_{\text{н}}$ – момент корисного навантаження на валу машини; M_j – момент сил інерції системи.

Пусковий струм асинхронного електродвигуна по можливості

повинен бути найменшим і не перевищувати припустиму межу для даного джерела чи системи живлення.

У зв'язку з цим до пуску асинхронних двигунів ставляться основні вимоги:

а) найбільша кратність пускового моменту

$$K_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}};$$

б) найменша кратність пускового струму

$$K_I = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}};$$

в) пуск повинен бути плавним, а тривалість пуску – невеликою.

Ці вимоги в основному і визначають способи пуску в хід трифазних асинхронних електродвигунів.

3.7.1. Пуск короткозамкнених електродвигунів

Пуск у хід трифазних короткозамкнених асинхронних електродвигунів може бути здійснений прямим вмиканням у мережу чи при зниженій напрузі живлення. На рис. 3.8 показані основні схеми пуску цих електродвигунів.

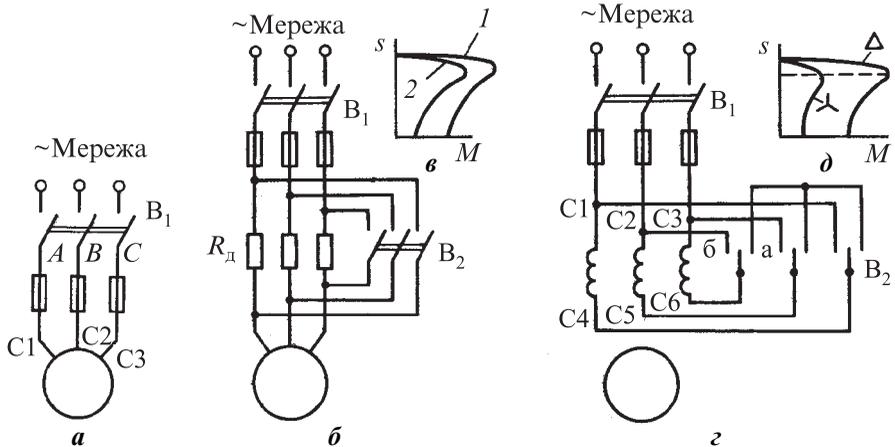


Рис. 3.8

Пуск електродвигунів прямим вмиканням у мережу найбільш розповсюджений і проводиться рубильником (див. рис. 3.8,*а*) чи іншим пусковим пристроєм. Цей спосіб простий і зручний в експлуатації, але він має велику кратність пускового струму $K_I = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 5,5 \dots 7,0$ і порівняно малу кратність пускового моменту $K_M = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} = 1,0 \dots 1,8$. Тому даний спосіб пуску застосовується в тих випадках, коли потужність електродвигуна відносно невелика в порівнянні з потужністю джерела живлення і, крім того, не потрібна плавність пуску. Якщо виконана перша з цих умов, то пусковий струм не викликає неприпустимого спадання напруги в мережі живлення. Для самого ж електродвигуна пусковий струм безпечний, тому що тривалість пуску невелика.

Пуск асинхронних електродвигунів при зниженій напрузі звичайно здійснюється переключенням обмотки статора із зірки на трикутник, включенням статора через автотрансформатор і введенням у коло статора дроселя чи пускового реостата. В усіх цих випадках знижується напруга на затискачах електродвигуна і, отже, зменшується величина пускового струму. Але при цьому пусковий момент електродвигуна зменшується майже пропорційно квадрату зниженої напруги. Тому такий спосіб застосуємо тільки при пуску електродвигунів ухолосту.

Пуск електродвигуна за допомогою пускового реостата (див. рис. 3.8,*б*) полягає в тому, що статор вмикається в мережу через пусковий реостат. Коли електродвигун розвине номінальну швидкість обертання, пусковий реостат шунтується рубильником B_2 , а обмотка статора включається на повну напругу мережі. Механічна характеристика показана на рис. 3.8,*в*.

Схема пуску електродвигуна за допомогою переключення обмотки його статора із зірки на трикутник наведена на рис. 3.8,*г*. Пуск проводиться в такий спосіб: перемикач ставлять у положення "а" (Y) і замикають триполюсний рубильник B_1 ; коли електродвигун розвине номінальне число обертів, тоді перемикач швидко переводять у положення "б" (Δ). Цим і закінчується процес пуску. Пусковий струм при цьому способі пуску зменшується в три рази в порівнянні зі струмом, що виникає під час пуску електродвигуна прямим вмиканням у мережу при з'єднанні обмотки статора трикутником. Дійсно, якщо фазні обмотки електродвигуна з'єднати зіркою, то пу-

сковий струм у лінійному проводі

$$I_{лY} = I_{фY} = \frac{U_{фY}}{Z_{ф}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_{ф}}.$$

Якщо ж обмотки електродвигуна при його пуску будуть з'єднані трикутником і підключені під ту ж саму лінійну напругу $U_{л}$, то лінійний пусковий струм буде іншим:

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3}I_{ф\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_{ф}}{Z_{ф}}.$$

Узявши відношення лінійних струмів, одержимо

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = \sqrt{3}\frac{U_{ф}}{Z_{ф}} : \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_{ф}} = 3.$$

Величина пускового моменту в цьому випадку зменшується також у три рази.

Механічна характеристика при з'єднанні зіркою (Y) та трикутником (Δ) показана на рис. 3.8,д.

Пуск електродвигуна за допомогою автотрансформатора полягає в тому, що статор вмикається в мережу через автотрансформатор. Коли електродвигун розвине номінальну швидкість обертання, автотрансформатор шунтується рубильником, а обмотка статора включається на повну напругу мережі. При цьому пусковий струм зменшується в k раз, де k – коефіцієнт трансформації автотрансформатора. Але складність схеми і висока вартість апаратури трохи обмежують застосування автотрансформаторного пуску асинхронних електродвигунів.

3.7.2. Пуск фазних електродвигунів

Пуск таких електродвигунів, як правило, проводиться за допомогою пускового реостата, що вводиться в коло ротора (рис. 3.9,а). Перед пуском реостат уводять у коло ротора, а по мірі розгону двигуна плавно зменшують опір реостата, виводячи його цілком до кінця пуску. Зупинка двигуна проводиться вимиканням рубильника.

Пусковий реостат у колі ротора зменшує пусковий струм і одночасно збільшує пусковий момент електродвигуна. Це пояснюєть-

ся тим, що, збільшуючи активний опір кола ротора, зменшують струм I_2 ротора, але одночасно збільшують $\cos \psi_2$, причому переважне значення має збільшення $\cos \psi_2$. У результаті цього активна складова струму ротора $I_2 \cos \psi_2$ збільшується, а з нею разом зростає і пусковий момент електродвигуна.



Рис. 3.9

На рис. 3.9,б показані залежності пускового струму і моменту від активного опору кола ротора, а на рис. 3.9,в – залежність обертаючого моменту від ковзання при різних опорах у колі ротора. Пусковий момент досягає найбільшого значення при $R'_2 \approx X_1 + X'_2$, де R'_2 становить суму активного опору обмотки ротора і пускового реостата. Змінюючи величину опору пускового реостата, можна отримати потрібну пускову характеристику електродвигуна.

3.8. Способи регулювання швидкості ротора

Підставимо в рівняння частоти обертання ротора

$$n_2 = n_1(1-s)$$

значення частоти обертання магнітного поля n_1 і значення ковзання s . У результаті виходить розгорнуте рівняння, що визначає залежність частоти обертання ротора асинхронного двигуна від різних параметрів кола:

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f}{p} \left(1 - \frac{3I_2^2 R_2}{P_{\text{ем}}} \right).$$

З нього випливає, що можливі чотири способи регулювання частоти обертання ротора асинхронних двигунів:

- 1) зміною частоти живильної мережі f ;
- 2) зміною опору R_2 ротора фазного двигуна;
- 3) переключенням обмоток статора двигуна з короткозамкненим ротором на різне число пар полюсів p магнітного поля;
- 4) зміною напруги, підведеної до статора двигуна, завдяки чому змінюється електромагнітна потужність $P_{ем}$.

Регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна за першим способом можливо здійснити при живленні двигуна від окремого генератора, тобто за системою Г–Д (генератор–двигун) змінного струму (рис. 3.10). Зміна частоти відбувається при зміні швидкості обертання первинного двигуна. При регулюванні частоти необхідно підтримувати сталість магнітного потоку, що забезпечує сталість моменту і струму.

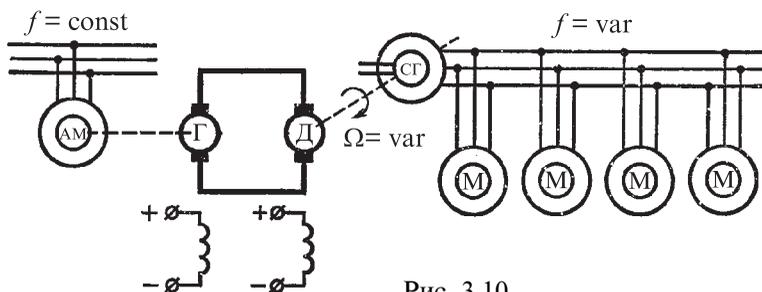


Рис. 3.10

Постійний потік буде в тому випадку, якщо при зміні частоти відповідно змінюється напруга, яка підводиться до двигуна. Такі системи застосовують у суднових електрогребних установках. Для регулювання швидкості суднових механізмів такий спосіб не застосовується.

В останні роки все більшого поширення набуває регулювання швидкості двигуна за допомогою зміни частоти напруги на статорній обмотці. При регулюванні частоти швидкість можна плавно змінювати так, що її максимальне значення буде в десятки чи сотні разів перевищувати мінімальне. Таку можливість дають напівпровідникові тиристорні перетворювачі частоти, що включаються між промисловою мережею 50 Гц і двигуном (рис. 3.11).

При другому способі передбачається введення додаткового опору в коло ротора двигуна з фазним ротором. При тому самому моменті частота обертання ротора знижується (ковзання s збільшується) при збільшенні опору ротора, що виходить з рівняння

$$M = c\Phi_m \frac{E_2 R_2}{\frac{R_2^2}{s} + sX_2^2} = c\Phi_m \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + sX_2^2}.$$

Критичний момент при цьому залишається незмінним, що випливає з рівняння

$$M_{кр} = \frac{3U_{1ф}^2}{2\omega_0(X_1 + X_2')},$$

а критичний опір зростає:

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}.$$

При різних значеннях додаткового опору утворюються різні регульовальні механічні характеристики (рис. 3.12).

Характеристики 1, 2 і 3 отримані при різних додаткових опорах у колі ротора $R_{д1} < R_{д2} < R_{д3}$, де опір $R_{д1}$ відповідає характеристиці 1 і т. д.

Звичайно для регулювання застосовують ступені пускового реостата, названого в цьому випадку *пускорегулюючим*. На відміну від суто пускових, пускорегулюючі опори повинні бути розраховані на нагрівання при тривалому проходженні по них струму.

Регулювання швидкості за розглянутим способом можливе лише в бік зменшення. При цьому пропорційно знижується ККД двигуна, що є основним недоліком цього способу регулювання.

Третій спосіб знаходить широке застосування в суднових електродвигунах. Число пар полюсів можна змінювати, переключачаючи фазні обмотки статора з однієї схеми з'єднання на іншу. Найбільш



Рис. 3.11



Рис. 3.12

розповсюджений випадок – це переключення зі схеми "проста зірка" на схему "подвійна зірка" (рис. 3.13). Кожна фазна обмотка двигуна

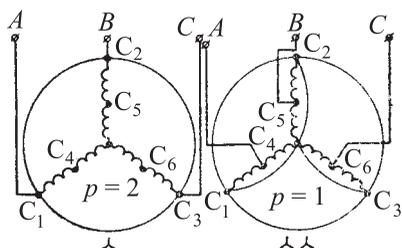


Рис. 3.13

має дві котушки. У першій схемі котушки з'єднані послідовно, а в другій – паралельно. Через це число полюсів зменшується вдвічі, а швидкість збільшується в два рази. Такі електродвигуни мають усього два ступені швидкості, що відносяться один до одного як 1:2.

Для суднових електроприводів застосовують багатошвидкісні електродвигуни, що мають дві незалежні одна від одної обмотки статора. Кожна з них утворює певне число пар полюсів. У тришвидкісних двигунів цього типу одна обмотка може переключатися, крім того, зі схеми трикутника чи зірки на схему подвійної зірки. У роботі цих двигунів при будь-якій швидкості бере участь лише одна обмотка статора. Співвідношення швидкостей у таких двигунів буває 1:2; 1:3; 1:4; 1:2:4; 1:3:6.

Для суднових електроприводів застосовують багатошвидкісні електродвигуни, що мають дві незалежні одна від одної обмотки статора. Кожна з них утворює певне число пар полюсів. У тришвидкісних двигунів цього типу одна обмотка може переключатися, крім того, зі схеми трикутника чи зірки на схему подвійної зірки. У роботі цих двигунів при будь-якій швидкості бере участь лише одна обмотка статора. Співвідношення швидкостей у таких двигунів буває 1:2; 1:3; 1:4; 1:2:4; 1:3:6.

Тут можливе тільки східчасте регулювання з фіксацією швидкості обертання на кожному ступені. Жорсткість регульовальних характеристик майже така ж, як у природної. Утрат енергії при регулюванні нема, але ККД і $\cos \phi$ багатошвидкісних двигунів трохи нижчі, ніж у звичайних двигунів, і вартість їх вища. При інших рівних умовах вони більші за розмірами і для керування ними потрібна більш складна й дорога апаратура.

Четвертий спосіб регулювання здійснюють, включаючи в коло статора трифазний дросель насичення. Він складається з трьох котушок змінного струму й однієї котушки постійного струму, розташованих на загальному сталевому магнітопроводі (рис. 3.14). Котушка постійного струму живиться від випрямляча через реостат.

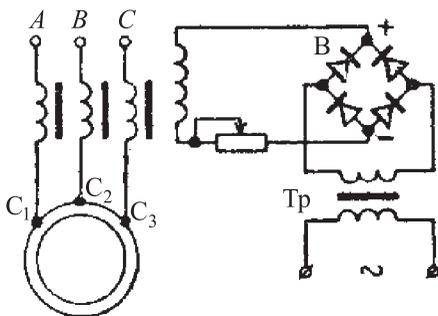


Рис. 3.14

Регулюючи величину постійного струму, змінюють ступінь

насичення магнітопроводу дроселя, унаслідок чого змінюється індуктивний опір обмоток змінного струму, що, у свою чергу, змінює напругу на затискачах статора і швидкість обертання двигуна.

Регульовальні характеристики наведені на рис. 3.15. Автоматично змінюючи за спеціальною схемою струм підмагнічування в залежності від швидкості обертання двигуна, можна одержати жорсткі характеристики. Однак така система має істотні недоліки: при регулюванні значно знижуються ККД і $\cos \phi$ двигуна, схема регулювання дуже складна, а самі дроселі громіздкі й дорогі. Тому в судових електроприводах такий спосіб регулювання не знаходить застосування.



Рис. 3.15

3.9. Однофазні асинхронні двигуни

У системах автоматичного керування, побутових приладах і промислових пристроях застосовуються однофазні асинхронні двигуни малої потужності. Для живлення однофазних двигунів потрібна однофазна мережа, яка має два проводи замість трьох проводів трифазної мережі, що дає в одних випадках економічну вигоду, в інших – зручність в експлуатації. Однофазні двигуни застосовуються в установках середньої потужності (кілька десятків кіловатів), де їхнє використання доцільне економічно (два проводи замість трьох) і за умовами експлуатації, наприклад у транспортних пристроях шахт. Серед великої різноманітності однофазних двигунів найбільшого поширення набули двигуни з короткозамкненою обмоткою ротора; ротор і його обмотка виконані так само, як і в трифазних двигунів. Статор таких двигунів буває з явновираженими полюсами та короткозамкненим витком (рис. 3.16,а) – його далі будемо називати двигуном А – і з неявновираженими полюсами та двома обмотками (див. рис. 3.16,б) – його далі будемо називати двигуном Б.

Двигуни мають робочу 1 і пускову 2 обмотки. Робоча обмотка двигуна А (див. рис. 3.16,а) складається з певного числа витків ізоляованого проводу і вмикається в мережу однофазного струму. Пу-

скова обмотка має всього один виток товстого дроту, що охоплює частину перерізу полюса.

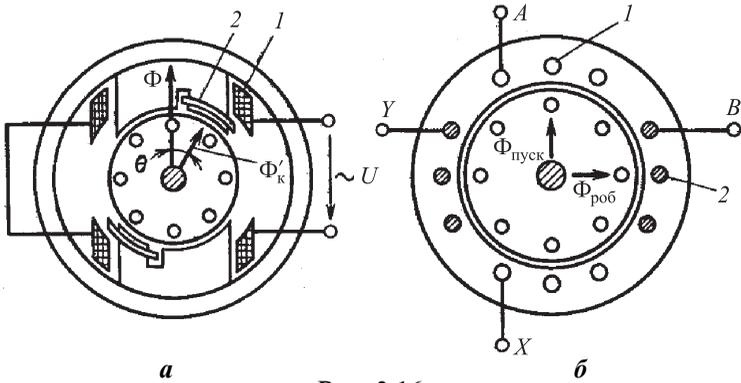


Рис. 3.16

Робоча і пускова обмотки двигуна Б (див. рис. 3.16,б) розташовані в пазах, як і в трифазних двигунів. Обмотки зміщені в просторі на 90° . Робочі обмотки 1 двигунів А і Б вмикаються в мережу однофазного струму. Струм, що виникає в обмотках 1 двигунів, створює нерухоме в просторі й пульсуюче з частотою мережі магнітне поле, що наводить в обмотці ротора ЕРС і струм. Легко показати, використовуючи правила правої і лівої руки, що в результаті взаємодії струму ротора з магнітним полем виникають сили (рис. 3.17,а), результуючий момент яких відносно осі обертання виявляється рівним нулю. Без додаткових пристроїв двигуни не розвивають моменту і самостійно розігнатися не можуть. Якщо ж ротору зовнішнім зусиллям додати невелику швидкість, він почне розвивати момент і розженеться самостійно до сталої швидкості, обумовленої моментом навантаження. Це пояснюється тим, що в обмотці ротора внаслідок перетинання магнітного поля виникають ще одна ЕРС і струм, у результаті взаємодії якого з полем статора створюється обертаючий момент. Для з'ясування характеру залежності $n = f(M)$ (механічної характеристики двигуна) роблять розкладання пульсуючого магнітного потоку на два обертові потоки. Нерухомим у

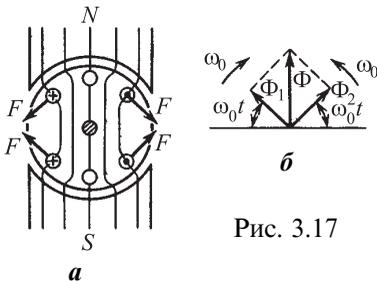


Рис. 3.17

слідок перетинання магнітного поля виникають ще одна ЕРС і струм, у результаті взаємодії якого з полем статора створюється обертаючий момент. Для з'ясування характеру залежності $n = f(M)$ (механічної характеристики двигуна) роблять розкладання пульсуючого магнітного потоку на два обертові потоки. Нерухомим у

просторі є магнітний потік, що змінюється в часі синусоїдально та еквівалентний двом однаковим магнітним потокам, які незмінні за значенням, обертаються в різні сторони з постійною кутовою частотою та дорівнюють половині амплітудного значення нерухомого потоку (див. рис. 3.17,б).

У системах автоматики застосовуються однофазні двигуни малої потужності (кілька одиниць і десятків ватів) з підвищеним опором короткозамкнутої обмотки ротора. Ці двигуни мають дві обмотки статора і таку будову, як конденсаторні однофазні двигуни, але відрізняються тим, що їхня обмотка ротора має значно більший опір. На відміну від однофазного, ці двигуни мають таку властивість, що при включенні лише однієї обмотки статора ротор не може розігнатися самостійно навіть у тому випадку, коли йому надана початкова швидкість.

Опір обмотки ротора підбирають такої величини, при якій критичне ковзання складає $1,5 \dots 2$, у результаті чого при одній включеній обмотці складові моменти M'_1 і M'_2 мають вигляд, зображений пунктирними лініями на рис. 3.18. Результируючий момент M' , що дорівнює сумі складових моментів, при будь-якій швидкості буде гальмівним.

Коли ж включені обидві обмотки, наприклад за схемою, зображеною на рис. 3.19,а, двигун працює так само, як конденсаторний, і розвиває рушійний момент.

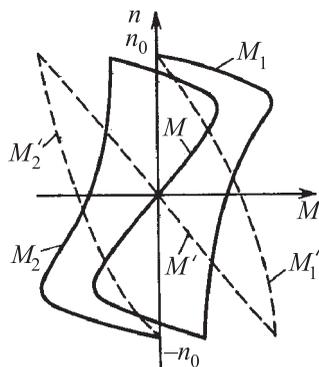


Рис. 3.18

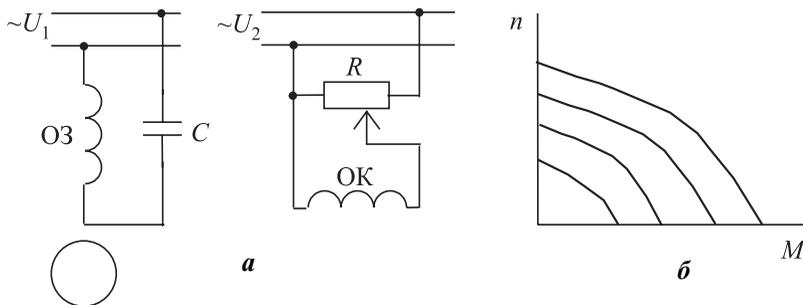


Рис. 3.19

Перевагою зазначених двигунів є те, що вони дозволяють регулювати шляхом зміни амплітуди або фази напруги на одній з обмоток частоту обертання ротора в значному діапазоні. На рис. 3.19,*а* показана одна з можливих схем включення, а на рис. 3.19,*б* – механічні характеристики такого двигуна. Обмотка збудження ОЗ через конденсатор C підключена до мережі з напругою U_1 , обмотка керування ОК через потенціометр R – до мережі з напругою U_2 . Напруги можуть бути однаковими. Регулювання частоти обертання здійснюється зміною напруги на обмотці ОК за допомогою потенціометра.

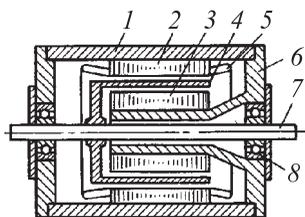


Рис. 3.20

Зупинимося коротко на двигунах з порожнистим ротором (рис. 3.20). Вони можуть бути однофазними, двофазними і трифазними. Статор і обмотка статора таких двигунів виготовляються так само, як у трифазних або однофазних двигунах, ротор же являє собою порожнистий циліндр, виготовлений з латуні, міді або алюмінію і розташований у зазорі сердечника статора. Двигун складається з корпусу 1, зовнішнього 2 і внутрішнього 3 сердечників статора, між якими розташовані порожнистий ротор 4 та обмотки статора 5, підшипникових щитів 6, вала 7 і підшипників 8. Принцип дії і характеристики подібних двигунів аналогічні принципам дії та характеристикам двигунів з короткозамкненим ротором. Головна їхня відмінність – мала інерційність ротора, що дуже важливо в системах, які швидко реагують на сигнал, що вводиться.

3.10. Асинхронний тахогенератор

Тахогенератор – електрична машина, що перетворює частоту обертання в електричний сигнал. Залежність напруги на виході тахогенератора від частоти обертання називається вихідною характеристикою. В ідеальному випадку ця залежність пряма. Тахогенератори використовуються для виміру частоти обертання, вироблення прискорюючих і сповільнюючих сигналів, для операції диференціювання.

Тахогенератор сконструйовано так само, як однофазний асинхронний двигун з порожнистим немагнітним ротором (рис. 3.20 і 3.21). У пазах статора вкладені дві зміщені в просторі на 90° обмотки: збу-

дження ОЗ (1) і вихідна генераторна ОГ (2). Схема включення тахогенератора зображена на рис. 3.22.

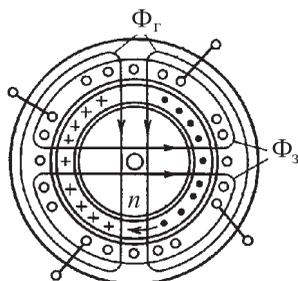


Рис. 3.21

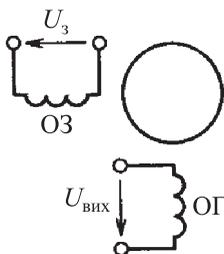


Рис. 3.22

Струм обмотки збудження, увімкненої до мережі змінного струму з напругою U_z , створює нерухомий у просторі пульсуючий з частотою мережі магнітний потік Φ_z . Цей потік пронизує тіло порожнистого немагнітного ротора і генераторну обмотку. При нерухомому порожнистому роторі ЕРС у генераторній обмотці не виникає в силу того, що магнітний потік розташований перпендикулярно до цієї обмотки. Струм, що виникає в порожнистому роторі, створює магнітний потік, спрямований проти потоку збудження, зменшує його значення, але не змінює його положення. Це відбувається тому, що через великий немагнітний зазор (два повітряні проміжки і стінка немагнітного ротора) індуктивний опір порожнистого ротора невеликий і струм у порожнистому роторі збігається за фазою з ЕРС.

Коли ж порожнистий ротор обертається, у результаті перетинання магнітного потоку збудження Φ_z в ньому виникає ЕРС обертання. Напрямок її для певного моменту часу вказаний на рис. 3.21 точками і хрестиками. ЕРС обертання спричиняє струм у порожнистому роторі, а струм створює магнітний потік Φ_g , який (див. рис. 3.21) збігається з віссю генераторної обмотки. У результаті в генераторній обмотці від цього потоку виникають: ЕРС, пропорційна коловій швидкості, тобто частоті обертання ($e = Blv$); струм, пропорційний ЕРС, і магнітний потік, пропорційний струму (магнітна система не насичена). Таким чином, ЕРС, що виникає в генераторній обмотці, пропорційна частоті обертання порожнистого ротора тахогенератора.

3.11. Сельсини

Асинхронні машини широко використовуються не тільки як двигуни, але і як регулятори напруги, фазообертачі, тахогенератори і пристрої синхронного зв'язку.

У силових електроприводах, системах керування електроприводами, системах автоматики виникає необхідність погодженого повороту на заданий кут двох чи декількох валів механізмів або осей, не зв'язаних між собою механічно.

У системах синхронного обертання тих або інших виробничих механізмів використовуються звичайні трифазні асинхронні двигуни з фазним ротором.

У системах дистанційної передачі кутових переміщень можуть бути використані звичайні трифазні асинхронні двигуни з контактними кільцями малої потужності, або сельсини. Сельсини сконстру-

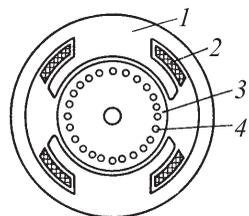


Рис. 3.23

йовані приблизно так само, як і трифазні двигуни (рис. 3.23). Статор 1 має однофазну обмотку, що називається обмоткою збудження 2, а ротор 3 – трифазну обмотку 4, названу обмоткою синхронізації, що має таку саме будову, як і асинхронний двигун з фазним ротором. Може бути й навпаки: ротор має однофазну, а статор – трифазну обмотку. Такі сельсини називаються однофазними.

Обмотки збудження можуть бути зосередженими або розподіленими. Сельсини бувають з контактними кільцями і безконтактними. Контактні кільця і щітки через їхню невисоку надійність та виникнення тертя між ними знижують надійність і точність системи регулювання, особливо в індикаторному режимі роботи. У системах синхронного обертання або дистанційної передачі кута беруть участь дві або більше машин. Одна з них є датчиком, що задає частоту обертання або кут повороту, інші – приймачами. У системах синхронного обертання приймачі повинні обертатися зі швидкістю датчика, у системах індикаторних – повертатися на той же кут, що і датчики.

У системах дистанційної передачі кутових переміщень розрізняють два режими роботи сельсинів: індикаторний і трансформаторний. Індикаторний режим має місце в тих випадках, коли на валу

сельсин-приймача відсутній гальмівний момент, наприклад на його валу вкріплена вказівна стрілка. Коли на валу сельсин-приймача значний момент, який він не в змозі подолати, система виконується так, що сельсин дає тільки сигнал керування, а механізм приводиться в дію від окремого двигуна. Сельсин-приймач у цьому випадку керує двигуном механізму так, що двигун повертає механізм на кут, заданий сельсин-датчиком.

На рис. 3.23 зображений пристрій однофазного сельсина з явно вираженими полюсами з контактними кільцями, на рис. 3.24 – безконтактного сельсина.

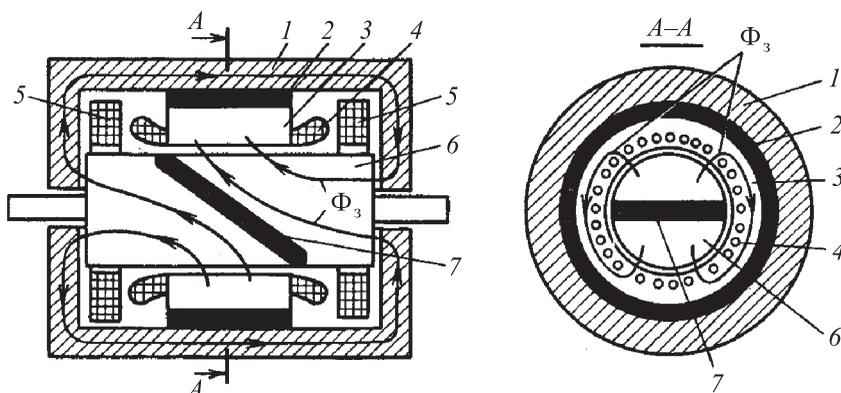


Рис. 3.24

Обмотка збудження 2 (див. рис. 3.23) контактного сельсина однофазна нерухома, обмотка ротора 4 трифазна, з'єднана зіркою, три кінці обмотки припаяні до контактних кілець, установлених на осі ротора. Безконтактний сельсин (див. рис. 3.24) містить такі елементи: 1 – магнітопровід потоку збудження; 2 – немагнітний циліндр; 3 – сердечник статора; 4 – трифазна обмотка синхронізації; 5 – обмотка збудження; 6 – сердечник ротора; 7 – немагнітна прокладка.

Однофазна обмотка збудження 5 безконтактного сельсина також нерухома, але магнітний потік збудження, створений нею, повертається при повороті ротора. Трифазна обмотка ротора 4 безконтактного сельсина, укладена в пазах статора, нерухома.

Принцип дії сельсина з контактними кільцями (рис. 3.25) полягає в наступному: струм обмотки збудження, що підключена до мережі змінної напруги U , створює нерухомих у просторі магнітний

потік Φ_3 , який пульсує з частотою мережі, пронизує трифазну обмотку і наводить у кожній з її фаз змінну ЕРС тієї ж частоти, що і в обмотці збудження. Значення ЕРС обмотки кожної фази залежить від взаємного розташування трифазної обмотки відносно магнітного потоку Φ_3 однофазної обмотки.

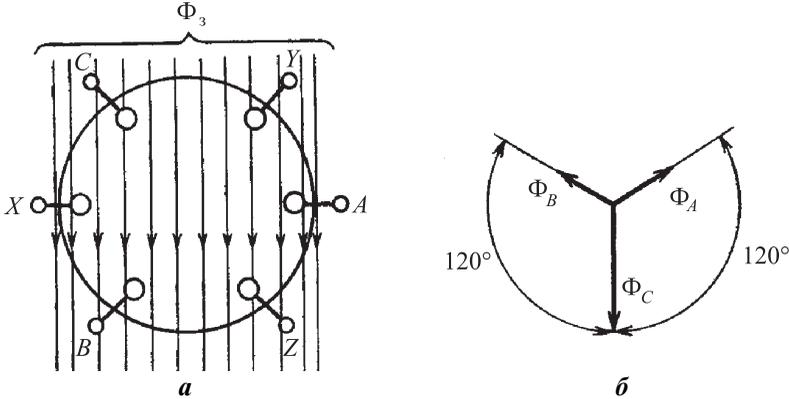


Рис. 3.25

Припустимо, трифазна обмотка розташована так, як це зображено на рис. 3.25,а. У цьому випадку обмотка фази AX буде пронизуватися всім потоком збудження і в ній виникне найбільша ЕРС. Обмотки BY і CZ (див. рис. 3.25,а,б) пронизуються меншим потоком, і в них виникне менша ЕРС, ніж у фазі AX . Якщо повернути ротор сельсина на кут φ , то зміниться взаємне розташування трифазної й однофазної обмоток і, природно, зміняться значення ЕРС, що наводяться в обмотках фаз. Наприклад, якщо повернути ротор на 90° , то магнітний потік, зчеплений з обмоткою фази AX , буде дорівнювати нулю і ЕРС у ній виникати не буде. Якщо три обмотки розташовані, як на рис. 3.25,а, то при повороті на кут φ вирази для ЕРС кожної фази будуть мати наступний вигляд:

$$e_A = E_m \cos \alpha; \quad e_B = E_m \cos(\alpha + 120^\circ); \quad e_C = E_m \cos(\alpha - 120^\circ),$$

де E_m – амплітудне значення ЕРС, що виникає у фазі обмотки AX при $\alpha = 0$.

Таким чином, значення ЕРС фаз трифазної обмотки однофазного сельсина залежать від кута α , у часі ж вони збігаються за фазою.

Принцип дії безконтактного сельсина нічим не відрізняється від контактного. Різниця лише в тому, що в контактному сельсині повертається ротор із трифазною обмоткою відносно нерухомого потоку збудження, у безконтактному повертається ротор з потоком збудження відносно нерухомої трифазної обмотки статора.

У трифазних сельсинах, де обмотка збудження трифазна і підключена до трифазної мережі, діє обертове магнітне поле з незмінною амплітудою і значення ЕРС у фазах синхронізуючої обмотки не залежать від кута повороту, змінюються лише фази ЕРС у часі.

Схема з'єднання сельсин-датчика і сельсин-приймача для дистанційної передачі кута повороту зображена на рис. 3.26. До повороту ротора сельсин-датчика ЕРС у кожній фазі трифазних обмоток сельсин-датчика і сельсин-приймача збігалися за фазою і струм у їхніх обмотках був відсутній: $\dot{E}_{A\text{дат}} - \dot{E}_{A\text{пм}}$.

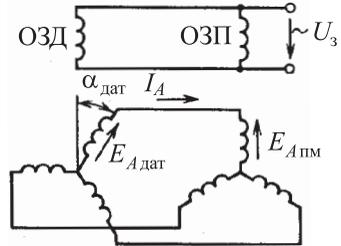


Рис. 3.26

При повороті датчика на кут $\alpha_{\text{дат}}$ у кожній фазі з'явиться струм, тому що ЕРС фаз не збігаються за фазою, наприклад у фазі A

$$I_A = \frac{|\overline{E}_{A\text{дат}} - \overline{E}_{A\text{пм}}|}{Z_{\text{дат}} - Z_{\text{пм}}}$$

Струм взаємодіє з магнітним потоком збудження відповідного сельсина, у результаті чого виникає момент, що прагне повернути ротор сельсин-приймача на той же кут, на який повернутий датчик; момент же, що діє на ротор датчика, прагне повернути його у вихідне положення, коли $\alpha_{\text{дат}} = 0$. Датчик утримується зовнішньою силою в положенні $\alpha_{\text{дат}}$, приймач повертається на кут $\alpha_{\text{пм}}$. Точність відпрацювання кута $\alpha_{\text{пм}}$ залежить від моменту сил опору на валу приймача.

Якщо $M = 0$, то $\alpha_{\text{пм}} = \alpha_{\text{дат}}$; якщо $M \neq 0$, то $\alpha_{\text{пм}} < \alpha_{\text{дат}}$. Трансформаторний режим роботи сельсинів здійснюється за схемою, зображеною на рис. 3.27. У цьому режимі роботи в однофазній обмотці сельсин-приймача виникає ЕРС, пропорційна куту повороту сельсин-датчика.

Коли кут повороту сельсин-датчика $\alpha_{\text{дат}} = 0$, струми у фазах

мають таке значення, що вісь створюваного ними результуючого магнітного поля і в сельсин-датчику, і в сельсин-приймачі збігається

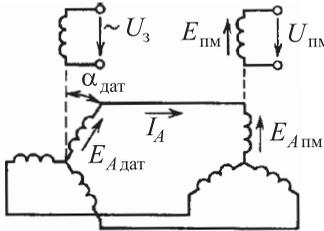


Рис. 3.27

з осями відповідно ОЗД та ОЗП. У результаті в обмотці ОЗП сельсин-приймача виникає найбільша ЕРС, рівна приблизно напрузі обмотки ОЗД. При куті $\alpha_{дат} \neq 0$ значення струмів у фазах обмоток будуть іншими, вісь створюваного ними магнітного поля не буде збігатися з віссю ОЗП і в ній виникне ЕРС меншого значення, ніж при $\alpha_{дат} = 0$. Коли $\alpha_{дат} = 90^\circ$, вісь результуючого магнітного поля буде перпендикулярна до осі обмотки ОЗП сельсин-приймача і ЕРС у ній стане рівною нулю. У системах автоматичного керування зручніше, щоб при погодженому положенні роторів датчика і приймача був нульовий сигнал. Для цього при погодженому положенні осі сельсинів розташовані під кутом 90° і кут повороту ротора датчика $\alpha_{дат}$ відраховується від цього положення. Напруга на виході сельсин-приймача в цьому випадку

$$U_{вих} = E \sin \alpha_{дат}.$$

3.12. Крокові мікродвигуни

У крокових мікродвигунах живлення обмоток статора може здійснюватися як однополярними, так і різнополярними прямокутними імпульсами напруги. Дані мікродвигуни можуть бути названі імпульсними. Вони широко застосовуються в приводах механізмів, у яких необхідно здійснювати старт-стоповий або безперервний рух, наприклад у стрічкопротяжних пристроях з метою введення і виведення інформації, приводах різних верстатів із програмним керуванням, лічильниках і т. д.

Розглянемо принцип роботи двигуна на прикладі крокового мікродвигуна з постійними магнітами, що називаються також магнітоелектричними (рис. 3.28). Статор двигуна має явновиражені полюси з обмотками збудження 1 і 2 (див. рис. 3.28,а). Обмотка збудження може бути виконана дво-, чотири- і багатополусною. У розглянутому двигуні вона чотириполюсна. Ротор – постійний магніт. При подачі прямокутних імпульсів напруги заданої послідовності

на обмотки збудження і зміні в них струмів I_{31} та I_{32} (див. рис. 3.28,з) вісь основного магнітного потоку стрибкоподібно повертається на 90° (а-в). Під дією моменту, що виникає в результаті взаємодії магнітних полів статора, створюваних обмоткою збудження і ротора як постійного магніту, ротор повертається також на 90° , тобто на одну полюсну поділку. Розглянута схема переключення двох обмоток збудження називається схемою чотиритактної різнополярної комутації. Якщо обмотки збудження створюють полярність полюсів, що чергуються відповідно до рис. 3.28,а-в, обертання ротора буде здійснюватися проти годинникової стрілки. Для зменшення кроку або полюсного поділу крокові мікродвигуни виконуються багатополюсними, причому число полюсів ротора дорівнює числу полюсів статора. Крок двигуна, тобто кут повороту ротора за один такт, може бути визначений як

$$\alpha_k = \frac{360}{kp},$$

де k – число тактів в одному циклі; p – число пар полюсів.

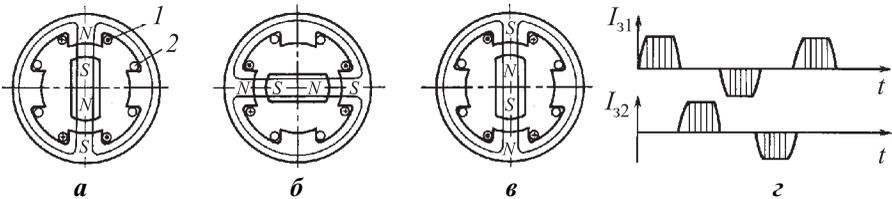


Рис. 3.28

Частота обертання ротора, об/хв, з урахуванням частоти подачі імпульсів

$$n = \frac{60f}{kp},$$

де f – частота подачі імпульсів, Гц.

Приклад 3.1. Технічні дані асинхронного двигуна типу АТ51-6 наведені в табл. 3.1.

Двигун може бути виготовлено на кожному з указаних напруг.

Таблиця 3.1

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	При номінальному навантаженні								
			Струм статора $I_{\text{ном}}$, А, при напрузі $U_{\text{ном}}$, В				η , %	$\cos \varphi$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$
			127	220	380	500					
АО51-6	2,8	950	19,7	11,4	6,8	5,0	82,5	0,78	5,0	1,3	1,8

Визначити: синхронну швидкість n_1 і повну номінальну потужність $S_{\text{ном}}$; номінальний $M_{\text{ном}}$, пусковий $M_{\text{пуск}}$ і максимальний M_{max} моменти; активну потужність $P_{\text{ном}}$, споживану з мережі при номінальному навантаженні; пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ при напрузі $U_1 = 220$ В.

Розв'язання. Синхронна швидкість двигуна

$$n_1 = 60 f / p = 60 \cdot 50 / 3 = 1000 \text{ об/хв,}$$

де p – число пар полюсів.

Про синхронну швидкість можна робити висновок також з номінальної швидкості: якщо номінальна швидкість $n_{\text{ном}} = 950$ об/хв, то найближча синхронна швидкість $n_1 = 1000$ об/хв.

Номінальне ковзання коливається в межах 1...6 %. У даному випадку

$$s_{\text{ном}} = [(n_1 - n_{\text{ном}}) / n_1] \cdot 100 = [(1000 - 950) / 1000] \cdot 100 \% = 5 \%.$$

Момент на валу двигуна можна визначити за рівнянням

$$M = P / \omega = \frac{P \cdot 60}{2\pi n} = 9,55 \frac{P}{n},$$

де P – потужність на валу; ω – кутова швидкість обертання вала.

Тоді

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \frac{2800}{950} = 28,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}) = 28,1 \cdot 1,3 = 36,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}) = 28,1 \cdot 1,8 = 50,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Потужність, споживана з мережі,

$$P_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \eta = 2,8 / 0,825 = 3,4 \text{ кВт.}$$

Номінальний струм

$$I_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} U_1 \cos\varphi \cdot \eta) = 2800 / (1,73 \cdot 220 \cdot 0,78 \cdot 0,825) = 11,4 \text{ А.}$$

Тоді $I_{\text{пуск}} = 57 \text{ А.}$

Приклад 3.2. Побудувати графік залежності обертаючого моменту двигуна від ковзання (від $s = 0$ до $s = s_{\text{кр}}$) для двигуна АО51-6, технічні дані якого наведені в табл. 3.1.

Розв'язання. При побудові графіка залежності $M = f(s)$ скористаємося наближеною залежністю

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

де s – ковзання при заданому моменті M ; $s_{\text{кр}}$ – критичне ковзання, що відповідає максимальному моменту M_{max} ;

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} \left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} \right)^2 - 1} \right) = 0,05 \left(1,8 \pm \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,165. \quad (3.3)$$

При значеннях $s < s_{\text{кр}}$ (стійкі режими) формула (3.3) дає значення M , близькі до дійсного.

При розв'язанні рівняння з двох можливих значень $s_{\text{кр}}$ вибираємо більше, тому що $s_{\text{кр}} > s_{\text{НОМ}}$.

Потім у формулу (3.3) по черзі підставляємо ряд значень ковзання. Отримані результати зведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

s	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,165	0,175
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	0	15	28,1	38,2	45	48,8	50,37	50,6	50,5

За даними табл. 3.2 будемо графік залежності $M = f(s)$ (рис. 3.29).

Як видно з побудови, в інтервалі $0 \leq s \leq s_{\text{НОМ}}$ характеристику

можна приблизно вважати прямолінійною, тобто швидкість двигуна зменшується зі зростанням моменту.

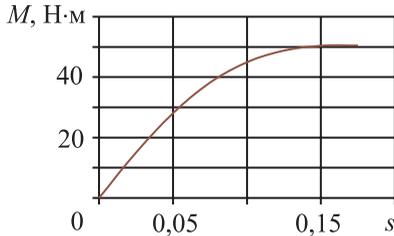


Рис. 3.29

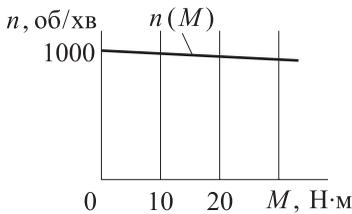


Рис. 3.30

Приклад 3.3. Побудувати механічну характеристику двигуна АО51-6, технічні дані якого зведені в табл. 3.1 і 3.2, для навантажувального режиму роботи, вважаючи характеристику прямолінійною на інтервалі $0 \leq s \leq s_{\text{ном}}$.

Розв'язання. Перша точка характеристики (рис. 3.30) має координати: $M_{\text{ном}} = 28,1$ Н·м, $n_{\text{ном}} = 950$ об/хв. Друга точка характеристики визначається синхронною швидкістю обертання $n_1 = 1000$ об/хв і лежить на осі ординат. Провівши через ці дві точки пряму, одержимо необхідну характеристику. У режимі роботи двигуном від $M = 0$ до

$M = M_{\text{ном}}$ механічну характеристику можна практично вважати прямолінійною.

Приклад 3.4. Визначити ЕРС у фазах статора і ротора асинхронного двигуна з контактними кільцями в роторі, а також частоту ЕРС у роторі в двох випадках: ротор нерухомий і в номінальному режимі обертається з ковзанням $s_{\text{ном}} = 0,03$; максимальний магнітний потік, що припадає на полюс, $\Phi_m = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Вб. Кількість витків та обмоткові коефіцієнти статора і ротора: $w_1 = 320$; $w_2 = 26$; $k_1 = 0,92$; $k_2 = 0,96$. Частота мережі $f = 50$ Гц.

Розв'язання. ЕРС у фазі статора

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 320 \cdot 0,92 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 1630 \text{ В.}$$

У нерухомому роторі частота струму дорівнює частоті мережі. ЕРС у фазі нерухомого ротора

$$E_{2\text{ном}} = 4,44 f_1 w_2 k_2 \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 26 \cdot 0,96 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 138 \text{ В.}$$

ЕРС у фазі ротора, що обертається з ковзанням $s_{\text{ном}} = 0,03$,

$$E_2 = E_{2\text{ном}} s_{\text{ном}} = 138 \cdot 0,03 = 4,14 \text{ В.}$$

ЕРС, що виникає в роторі на початку пуску двигуна, при номінальному навантаженні зменшується до $1 \pm 6\%$ від $E_{2\text{ном}}$.

Частота ЕРС ротора при номінальному навантаженні $f_2 = f_1 s_{\text{ном}} = 50 \cdot 0,03 = 1,5$ Гц (тільки при пуску частота ЕРС ротора дорівнює 50 Гц, а в номінальному режимі коливається звичайно в межах 0,5...3 Гц).

Приклад 3.5. Знайти струм у фазі ротора асинхронного двигуна (див. приклад 3.4) у номінальному режимі й у режимі пуску, якщо активний опір фази ротора $R_2 = 0,2$ Ом, індуктивний опір нерухомого ротора $X_2 = 1$ Ом.

Розв'язання. Струм у фазі ротора I_2 знаходиться з виразу

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_{2s}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (X_2)^2}}.$$

Цей вираз показує, що струм в обертовому роторі можна розглядати як струм нерухомого ротора (E_2 – ЕРС нерухомого ротора), беручи повний опір його кола

$$Z_{2s} = \sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}.$$

Струм у фазі ротора при номінальному режимі ($s_{\text{ном}} = 0,03$)

$$I_2 = E_2 / \sqrt{R_2^2 + (s_{\text{ном}} X_2)^2} = 4,14 / \sqrt{0,2^2 + (0,03 \cdot 1)^2} = 20,3 \text{ А}$$

або

$$I_2 = E_2 / \sqrt{(R_2/s)^2 + (X_2)^2} = 138 / \sqrt{(0,2^2 / 0,03)^2 + 1} = 20,3 \text{ А}.$$

У режимі пуску двигуна еквівалентний опір кола ротора R_2/s збільшується від R_2 до $R_2/s_{\text{ном}}$, що приводить до значного зменшення струму в роторі. Кратність пускового струму стосовно номінального звичайно не перевищує 5...9.

Приклад 3.6. Для двигуна з напругою 380 В, пусковим струмом 50,5 А та пусковим моментом 36,7 Н·м при пуску його без додаткового реостата знайти пусковий момент і пусковий струм у разі зниження напруги мережі на 20 %.

Розв'язання. Оскільки пусковий момент пропорційний квадрату

прикладеної напруги, то його величина при зниженні напруги на 20 % визначиться з виразу

$$M'_{\text{пуск}} = (0,8U_{\text{л}} / U_{\text{л}})^2 M_{\text{пуск}} = 0,64 \cdot 36,7 = 23,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Пусковий струм пропорційний прикладеній напрузі, отже

$$I'_{\text{пуск}} = 0,8I_{\text{пуск}} = 0,8 \cdot 50,5 = 40,4 \text{ А.}$$

Приклад 3.7. Ротор двигуна при номінальному навантаженні обертається зі швидкістю $n_{\text{ном}} = 2970$ об/хв, частота мережі $f = 50$ Гц, активний опір фази ротора $R_2 = 0,03$ Ом.

Визначити додатковий опір $R_{\text{д}}$, який необхідно включити у фазу обмотки ротора, щоб при тих же значеннях електромагнітного моменту і частоти мережі швидкість двигуна $n = 2400$ об/хв.

Розв'язання. Ковзання при $n_{\text{ном}} = 2970$ об/хв

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}}) / n_1 = (3000 - 2970) / 3000 = 0,01;$$

при $n = 2400$ об/хв

$$s = (n_1 - n) / n_1 = (3000 - 2400) / 3000 = 0,2.$$

Щоб електромагнітний момент не змінювався при зміні ковзання, необхідно залишити незмінним струм двигуна; це, відповідно до схеми заміщення асинхронного двигуна, одержимо за умови

$$\frac{R'_2}{s_{\text{ном}}} = \frac{R'_2 + R'_{\text{д}}}{s} \quad \text{або} \quad \frac{R_2}{s_{\text{ном}}} = \frac{R_2 + R_{\text{д}}}{s},$$

звідки

$$R_{\text{д}} = R_2 (s / s_{\text{ном}} - 1) = 0,33(0,2 / 0,01 - 1) = 0,57 \text{ Ом.}$$

Приклад 3.8. Номінальна потужність асинхронного двигуна $P_{\text{ном}} = 100$ кВт. При холостому ході потужність утрат двигуна $P_0 = 5,15$ кВт, а при короткому замиканні (проводиться при номінальному струмі) – $P_{\text{к}} = 5,55$ кВт. Визначити ККД при номінальному режимі.

Розв'язання. Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна можна знайти, як і для трансформатора, з дослідів холостого ходу та короткого замикання, при якому ротор двигуна загальмований.

При номінальному навантаженні

$$\begin{aligned}\eta_{\text{НОМ}} &= \left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}} + P_{\text{М}} + P_{\text{С}} + P_{\text{К}}} \right) \cdot 100\% \approx \left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}} + P_{\text{К}} + P_0} \right) \cdot 100\% = \\ &= \left(\frac{P_{\text{К}} + P_0}{P_{\text{НОМ}} + P_{\text{К}} + P_0} \right) \cdot 100\% = 90,3\%.\end{aligned}$$

4. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

4.1. Будова

Електричні машини постійного струму поділяються за призначенням на електричні генератори та електричні двигуни.

Будова машини постійного струму показана на рис. 4.1. Основними частинами машини є станина 1, осердя полюсів 2, обмотка полюсів (обмотка збудження) 3, якорь (осердя з обмоткою) 5, колектор 9, підшипникові щити (передній і задній), траверса з щіткотримачами та щітками, вал якоря 4, осердя додаткових полюсів 6, обмотка додаткових полюсів 7, обмотка якоря 8, осердя основних полюсів 11, лапи 12. На валу якоря закріплено вентилятор. Станина 1 – це литий або зварений циліндр, виготовлений з чавуну чи сталі з високою магнітною провідністю. Вона є магнітопроводом, а також основою для кріплення полюсів, підшипникових щитів, вивідних затискачів на клемному щитку.

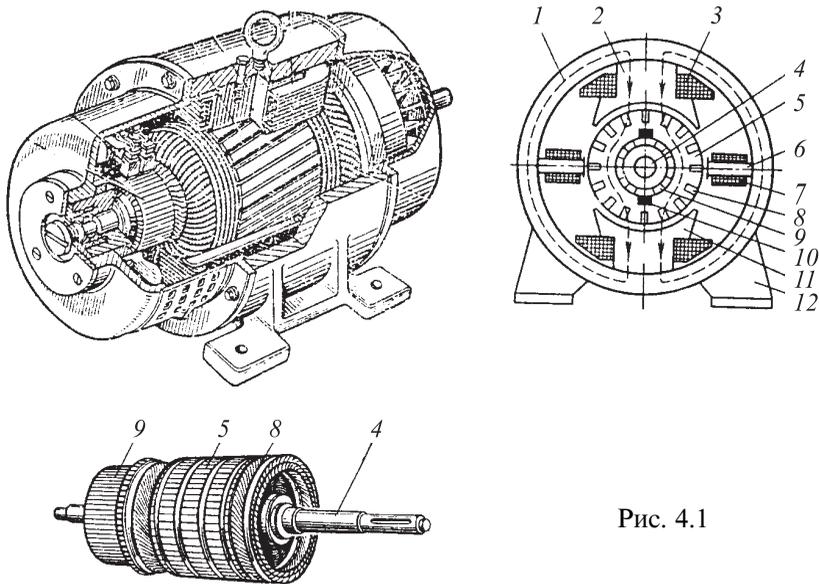


Рис. 4.1

Осердя якоря ротора – це сталевий циліндр, складений з окремих штампованих листів електротехнічної сталі, ізольованих один

від одного для зменшення вихрових струмів. На поверхні якоря є пази, в які вкладають обмотку.

Колектор 9 складається з окремих пластин клиноподібної форми, виготовлених з міді. Вони ізолювані одна від одної слюдою. До кожної колекторної пластини прикріплюють відводи від обмотки якоря. Осердя якоря з обмоткою і колектором закріплюють на валу, ізолюючи їх від вала. Щітка 10 – це мідно-графітова прямокутна призма.

4.2. Принцип дії

Принцип дії машини постійного струму розглянемо на прикладі генератора постійного струму.

Генератори постійного струму застосовуються як збудники синхронних генераторів, у зарядних пристроях, на автомобілях, використовуються як зварювальні генератори.

Принцип дії генератора постійного струму ґрунтується на законах електромагнітної індукції та електромагнітних сил.

У провіднику, що рухається в магнітному полі генератора, постійний струм виникнути не може. Постійні ЕРС і струм можуть створюватися тільки випрямленням змінної ЕРС, що виникає в обмотці генератора змінного струму. До пластин колектора приєднують кінці витка. Щітки на колекторі встановлені нерухомо так, щоб вони при обертанні витка з півкільцями переходили з одного півкільця на друге, коли індукована ЕРС у витку дорівнює нулю.

Як видно з рис. 4.2, щітка A завжди в контакті з тим півкільцем, провід від якого проходить під південним полюсом, а щітка B – з тим, провід якого проходить під північним полюсом.

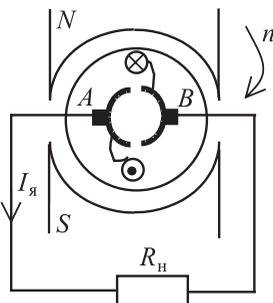


Рис. 4.2

Тому в зовнішньому колі струм проходить в одному напрямку – від щітки A до щітки B . Графік випрямленого струму показано на рис. 4.3, де видно, що випрямлений струм є пульсуючим. Для зменшення пульсації ЕРС і струму на роторі збільшують кількість витків та відповідно колекторних пластин, до яких приєднують кінці витків. На рис. 4.3 показані криві зміни ЕРС у рамці (a) та в зовнішньо-

му колі (б). Пульсація ЕРС значно зменшиться при двох рамках, розташованих у пазах якоря перпендикулярно одна до одної (див. рис. 4.3,в). У той час як в одній рамці ЕРС дорівнює нулю, в іншій індукується найбільша ЕРС. На щітках колектора маємо результуючу ЕРС, що дорівнює сумі ЕРС обох рамок. Щоб ще зменшити пульсацію ЕРС, у пази якоря вкладають не дві, а декілька десятків зміщених одна від одної рамок на деякий кут, а колектор роблять з більшим числом пластин.

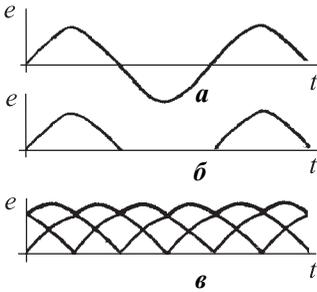


Рис. 4.3

4.3. Електрорушійна сила

Визначимо величину ЕРС якоря. При обертанні витка в магнітному полі в ньому буде наведена ЕРС $e = Blv$, де B – магнітна індукція; l – довжина якоря; v – частота обертання якоря, об/хв. Якщо загальну кількість провідників якоря візьмемо N , а $2a$ – це число паралельних гілок, то в одній паралельній гілці послідовно буде з'єднано $N/2a$ провідників.

ЕРС якоря генератора

$$E = \frac{BlvN}{2a}. \quad (4.1)$$

Частота обертання якоря $v = \frac{\pi Dn}{60}$, де D – діаметр якоря. Якщо

$D = 2p\tau$, то $v = \frac{\pi Dn}{60} = \frac{2p\tau n}{60}$, де $2p$ – число полюсів; τ – полюсний поділ.

Підставимо значення v у рівняння (4.1):

$$E = Bl \frac{2p\tau n}{60} \frac{N}{2a}. \quad (4.2)$$

Магнітний потік одного полюса $\Phi = Bl\tau$, а магнітна індукція

$$B = \frac{\Phi}{l\tau}. \quad (4.3)$$

Підставимо (4.3) в рівняння (4.2). Тоді ЕРС якоря

$$E = \frac{pn}{60a} \Phi n = c_e \Phi n. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт c_e – стала величина, яка залежить від параметрів машини. Він називається коефіцієнтом ЕРС.

За формулою (4.4) можна визначити як ЕРС генератора, так і ЕРС двигуна.

4.4. Електромагнітний момент машини

Електромагнітна сила, яка діє на провідник обмотки якоря, визначається співвідношенням

$$F_{\text{пр}} = \frac{BlI_{\text{я}}}{2a},$$

де $I_{\text{я}}$ – струм якоря, А.

Електромагнітний момент, що діє на провідник зі струмом,

$$M = F_{\text{пр}} \frac{D}{2},$$

а електромагнітний момент, який діє на якір,

$$M = F_{\text{пр}} \frac{D}{2} N = Bl \frac{I_{\text{я}}}{2a} \frac{D}{2} N. \quad (4.5)$$

Після заміни в (4.5) магнітної індукції за виразом $B = \frac{\Phi}{\pi D l / 2 p}$ маємо

$$M = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi I_{\text{я}} = c_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (4.6)$$

де $c_M = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi}$ – коефіцієнт моменту, який залежить від конструктивних властивостей машини.

Як бачимо, електромагнітний момент прямо пропорційний добутку магнітного потоку на струм якоря. За формулою (4.6) можна визначити як момент генераторів, так і момент двигунів.

Якщо момент виражений у Н·м, то між коефіцієнтами c_e і c_M існує залежність $c_e / c_M \approx 0,105$.

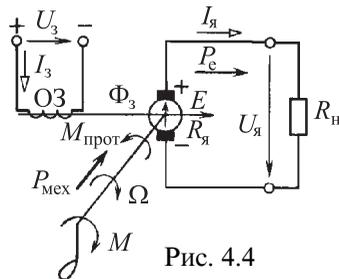
Електромагнітний потік, створений взаємодією магнітного потоку і струму якоря та визначений за формулою (4.6), відрізняється від моменту на валу машини внаслідок тертя в підшипниках обертового якоря о повітря і вентиляційних утрат. Ці два моменти відрізняються незначно, тому будемо вважати, що вони дорівнюють один одному.

4.5. Режим роботи машин постійного струму

Як було раніше сказано, машина постійного струму може працювати в режимі генератора або двигуна.

Режим генератора

Якщо машина працює в режимі генератора (рис. 4.4), то до якоря, який обертається, приєднують споживача (навантаження). Під дією ЕРС виникає струм. За другим законом Кірхгофа визначаємо напругу на затискачах:



$$U = E - R_{я} I_{я},$$

де $R_{я}$ – активний опір кола якоря; E визначається за формулою (4.4).

Якщо помножити обидві частини рівняння на струм якоря $I_{я}$, то отримаємо баланс активних потужностей:

$$U I_{я} = E I_{я} - R_{я} I_{я}^2,$$

де $U I_{я} = P_e$ – електрична потужність; $E I_{я} = P_{ем}$ – електромагнітна потужність; $R_{я} I_{я}^2 = \Delta P_e$ – потужність електричних утрат.

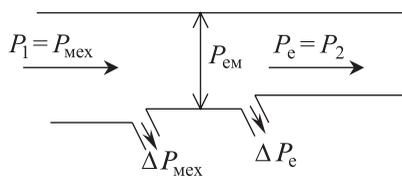


Рис. 4.5

Рівняння балансу потужностей генератора (без урахування потужності магнітних утрат і потужності збудження) ілюструється енергетичною діаграмою (рис. 4.5).

При роботі генератором машина створює протидіючий електрома-

гнітний момент $M_{\text{прот}}$, який повинен бути подоланий первинним двигуном.

Режим двигуна

Розглянемо роботу електричної машини в режимі двигуна постійного струму. Для цього необхідно на щітки машини подати напругу від зовнішнього джерела живлення (рис. 4.6).

На схемі вказано напрямок струму $I_{\text{я}}$ та напруги U . На провідник зі струмом діє електромагнітна сила, якір почне обертатись. Струм якоря $I_{\text{я}}$ та ЕРС мають протилежний напрямок. Напруга на затискачах двигуна

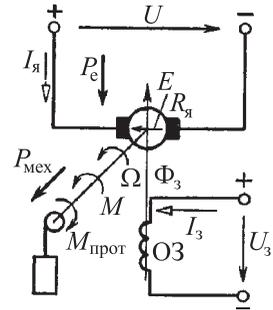


Рис. 4.6

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

Оскільки на кожен провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, завжди діє електромагнітна сила, якір двигуна буде обертатися проти годинникової стрілки. При обертанні якоря в його обмотці наводиться ЕРС. Відповідно до правила правої руки знайдемо, що в кожному провіднику якоря струм і ЕРС спрямовані назустріч одне одному. Тому ЕРС якоря двигуна звичайно називають проти-ЕРС. Таким чином, машина постійного струму, що працює в режимі двигуна, створює проти-ЕРС. Напруга, що прикладена до затискачів обмотки якоря двигуна, дорівнює сумі проти-ЕРС і спаду напруги на внутрішньому опорі якоря.

Для зміни напрямку обертання якоря двигуна (реверсування) необхідно змінити напрямок струму в обмотці якоря або в обмотці збудження. Переконаємося в справедливості цього, застосувавши правило лівої руки. За аналогією з генератором рівняння балансу потужностей у колі якоря двигуна одержимо у вигляді $UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$. Це рівняння ілюструється енергетичною діаграмою (рис. 4.7).

Таким чином, машина постійного струму може працювати як генератором, так і двигуном. При роботі генератором механічна енергія привідного дви-

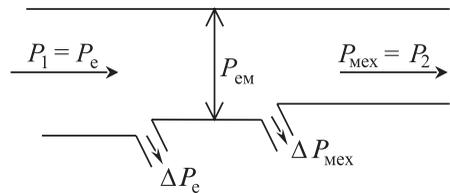


Рис. 4.7

гуна перетворюється в електричну енергію постійного струму, а при роботі двигуном електрична енергія перетворюється в механічну.

Отже, в електричній машині постійного струму напрямок перетворення енергії може бути змінений на зворотний. Цю властивість називають *оборотністю машини*.

4.6. Реакція якоря

При роботі генераторів і двигунів без навантаження (вхолосту) струм в обмотці якоря відсутній (або дуже малий) і магнітне поле машини збуджується тільки МРС обмотки збудження (рис. 4.8,*а*). Поле виявляється симетричним відносно осі головних полюсів. У секціях обмотки якоря, що знаходяться на геометричній нейтралі ГН та замкнені щітками накоротко, ЕРС не індукується.

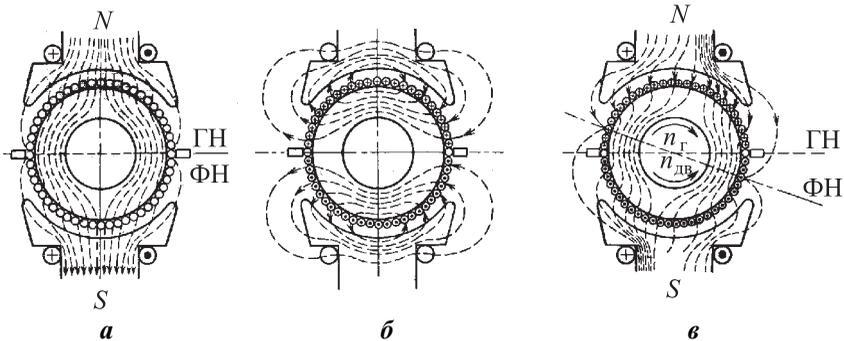


Рис. 4.8

Варто звернути увагу на те, що провідники обмотки якоря розташовані умовно не в пазах магнітопроводу якоря, як це роблять насправді, а на поверхні якоря; крім того, умовно не показаний колектор і щітки стосуються безпосередньо провідників обмотки якоря.

При роботі машини з навантаженням в обмотці якоря виникає струм і магнітне поле машини збуджується магніторушійними силами обмотки збудження та обмотки якоря.

Вплив МРС обмотки якоря на магнітне поле машини називається *реакцією якоря*.

Розглянемо реакцію якоря, якщо щітки розташовані на геометричній нейтралі.

На рис. 4.8 показані магнітні поля: *б* – утворене під дією МРС

обмотки якоря; \mathbf{v} – результуюче. Зазначені на рис. 4.8,*в* напрямки струмів обмотки якоря відповідають зазначеним там же напрямкам обертання генератора і двигуна. У випадку розташування щіток на геометричній нейтралі виникає поперечна реакція якоря, яка характеризується тим, що вісь симетрії поля реакції якоря (див. рис. 4.8,*б*) перпендикулярна до осі головних полюсів. У результаті дії поперечної реакції якоря магнітне поле машини виявляється несиметричним відносно осі головних полюсів (див. рис. 4.8,*в*). Під одним краєм кожного полюса магнітна індукція збільшується, під іншим зменшується. Фізична нейтраль ФН, під якою розуміють лінію, що проходить через вісь машини і точки поверхні якоря, де магнітна індукція результуючого поля дорівнює нулю, зміщається в генераторі в напрямку обертання, у двигунів – проти напрямку обертання. При відсутності струму якоря фізична нейтраль збігається з геометричною (див. рис. 4.8,*а*). У результаті дії реакції якоря в секціях обмотки якоря, розташованих на геометричній нейтралі, виникає ЕРС. Між колекторними пластинами, приєднаними до секцій, що знаходяться в посиленому магнітному полі головних полюсів, з'являється підвищена напруга, яка може привести до виникнення дуги. Для усунення перекручування магнітного поля під полюсами великі машини, що працюють з частими і значними перевантаженнями, забезпечуються компенсаційною обмоткою.

Останню закладають у пази полюсних наконечників (рис. 4.9) і з'єднують поспільно з обмоткою якоря, у результаті чого створюється магнітне поле в зоні розташування полюсів, протилежне за напрямком полю реакції якоря.



Рис. 4.9

Вплив поперечної реакції якоря на результуюче магнітне поле залежить від ступеня насичення феромагнітного матеріалу магнітного кола і значення струму якоря. У загальному випадку через насичення феромагнітного матеріалу магнітна індукція під одним краєм полюса зростає менше, ніж зменшується під іншим; у результаті магнітний потік машини трохи зменшується. Однак при навантаженнях, на які розраховуються машини при нормальних умовах їхньої роботи, магнітний потік змінюється на відносно невелике значення, тому вплив поперечної реакції якоря на магнітне поле в розрахунках часто не враховують.

При обертанні якоря машини щітки, переходячи з однієї колекторної пластини на іншу, замикають накоротко на деякий час секції, з'єднані з цими пластинами. При цьому відбуваються процеси перемикання секцій з однієї паралельної гілки обмотки якоря на іншу. Ці процеси і всі явища називають *комутацією*.

Для створення безіскрової комутації на машинах установлюють додаткові полюси. Магнітний потік додаткових полюсів спрямований назустріч магнітному потоку якоря, а оскільки обидва вони пропорційні струму навантаження, то магнітний потік якоря автоматично компенсується при будь-якому навантаженні.

4.7. Генератори постійного струму

4.7.1. Типи генераторів постійного струму

Для створення магнітного потоку в основних полюсах машини їх обмотка збудження повинна живитися постійним струмом.

Струм збудження машин постійного струму може подаватись від стороннього джерела електричної енергії або безпосередньо від генератора. У першому випадку машину називають генератором з незалежним збудженням, у другому – із самозбудженням. У залежності від способу збудження розрізняють:

- 1) генератори незалежного збудження, в яких обмотка збудження під'єднується до стороннього джерела (рис. 4.10,*а*);
- 2) генератори паралельного збудження (або шунтові), в яких обмотку збудження з'єднано паралельно з обмоткою якоря (рис. 4.10,*б*);
- 3) генератори послідовного збудження (або серієсні), де обмотку збудження з'єднують послідовно з обмоткою якоря (рис. 4.10,*в*);

4) генератори змішаного збудження (або компаундні), котрі мають дві обмотки збудження, одну з яких вмикають послідовно, а другу – паралельно обмотці якоря (рис. 4.10,*г*).

Кінці всіх обмоток машин постійного струму виводять на клемний щиток і позначають так: обмотку якоря – $Я_1$ - $Я_2$; додаткову – $Д_1$ - $Д_2$; шунтову – $Ш_1$ - $Ш_2$; серієсну – $С_1$ - $С_2$.

4.7.2. Характеристики генератора

Основні величини, які визначають роботу генератора, залежать одна від одної. Ця залежність установлюється за допомогою характеристик, які зображаються у вигляді кривих. Найбільш важливими характеристиками генератора є наступні:

1. Характеристика холостого ходу – залежність ЕРС генератора E від струму збудження I_3 при постійній частоті обертання якоря n і відсутності струму якоря $I_я$, тобто $E = U_0 = f(I_3)$ при $n = \text{const}$, $I_я = 0$, де U_0 – напруга генератора при холостому ході.

2. Зовнішня характеристика – залежність напруги U на затискачах генератора від струму навантаження I при постійній частоті обертання якоря n і незмінному опорі кола збудження R_3 , тобто $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $R_3 = \text{const}$ або $I_3 = \text{const}$.

3. Регульовальна характеристика – залежність струму збудження I_3 від струму навантаження I при постійній частоті обертання якоря n і напрузі U на затискачах генератора, тобто $I_3 = f(I)$ при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$.

4.7.3. Генератор з незалежним збудженням

У генератора з незалежним збудженням обмотка збудження підключена до незалежного джерела постійного струму. На рис. 4.11 наведена його принципова електрична схема, де позначено: Я – якор; ОЗ – обмотка збудження; $R_{p.3}$ – регульовальний реостат, призначений для зміни струму збудження; R_n – реостат навантаження.

Генератор збуджується нормально при відсутності навантаження. Для збудження генератора необхідно запустити первинний двигун у хід та досягнути номінальної частоти обертання якоря. Потім, замкнувши коло збудження і змінюючи струм за допомогою регульовального реостата, довести напругу до $U_0 = (1,1 \dots 1,25) U_{\text{ном}}$. При цьому струм збудження визначається формулою

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3 + R_{p.3}},$$

де $(R_3 + R_{p.3})$ – опір кола збудження.

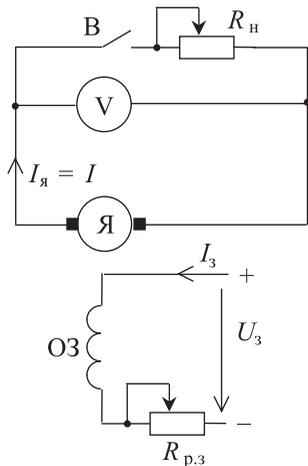


Рис. 4.11

Якщо генератор працює вхолосту, то ЕРС дорівнює напрузі на затискачах: $E = U_0$. Характеристика холостого ходу $U_0 = f(I_3)$ показана на рис. 4.12. Крива спочатку має прямолінійний характер і потім із збільшенням струму збудження поступово загинається. Точка

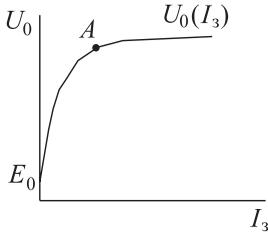


Рис. 4.12

А характеристики, що відповідає номінальній напрузі, лежить на коліні кривої. Якби вона лежала на початковій прямолінійній частині кривої, напруга дуже змінювалася б при зміні навантаження. Якби ця точка лежала вище коліна кривої, то обмежувалася б можливість регулювати напругу.

Величина E_0 відповідає залишковій намагніченості.

При роботі генератора з навантаженням струм якоря і струм навантаження рівні, а напруга на затискачах генератора змінюється зі зміною навантаження та визначається за рівнянням рівноваги ЕРС:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}}; \quad U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}},$$

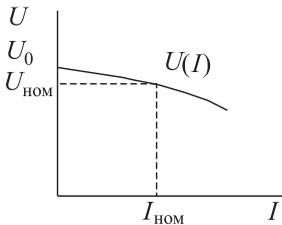


Рис. 4.13

де $I_{\text{я}}$ – струм якоря; $I_{\text{н}}$ – струм навантаження.

Зміна напруги генератора при зміні навантаження від холостого ходу до номінального встановлюється зовнішньою характеристикою (рис. 4.13).

Як видно із зовнішньої характеристики $U(I)$, напруга генератора із зменшенням його навантаження збільшується. Це зумовлено, по-перше, зменшенням реакції якоря і, отже, посиленням загального магнітного потоку, а по-друге – зменшенням утрати напруги в обмотці якоря.

Спад напруги при номінальному навантаженні становить 5...10% від $U_{\text{ном}}$. Відносна зміна напруги генератора

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \%$$

Для підтримки постійної напруги на затискачах генератора необхідно по мірі збільшення навантаження збільшувати струм збу-

дження шляхом виведення регульовального реостата. На рис. 4.14 показана регульовальна характеристика, що встановлює закон регулювання струму збудження.

Регульовальну характеристику $I_3 = f(I)$ знімають, змінюючи струм навантаження і регулюючи струм збудження так, щоб напруга на затискачах генератора була сталою. При збільшенні струму навантаження слід збільшувати струм збудження, а це приведе до збільшення потоку і ЕРС генератора.

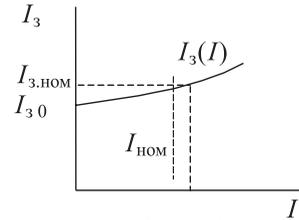


Рис. 4.14

Таким чином, генератор незалежного збудження має наступні властивості: 1) збуджується як при розімкненому, так і при замкнутому зовнішньому колі, тому що коло збудження незалежне від кола якоря; 2) при переході від холостого ходу до номінального навантаження зміна напруги незначна, тобто при роботі генератора напруга на його затискачах досить стабільна; 3) небезпечні короткі замикання, оскільки в момент замикання ЕРС генератора продовжує залишатися значною, а опір зовнішнього кола дорівнює нулю.

Генератори незалежного збудження застосовуються як генератори низької напруги (5...24 В) і високої напруги (600 В і вище), а також як генератори великої потужності, що вимагають широкого й плавного регулювання напруги.

4.7.4. Генератори із самозбудженням

Генератори із самозбудженням розділяються на генератори паралельного, послідовного і змішаного збудження. Самозбудження цих генераторів засноване на явищі залишкового намагнічування.

Дійсно, при обертанні якоря в полі залишкового намагнічування в його обмотці індукуються невелика ЕРС E_0 , величиною близько 3...5 % від U_0 . Ця ЕРС, як тільки коло якоря буде замкнуте на обмотку збудження, створить у колі збудження невеликий струм, що, у свою чергу, створить невеликий магнітний потік. Якщо цей потік збігається за напрямком з потоком залишкового намагнічування, то магнітне поле машини підсилиться, що збільшить індуквану в якорі ЕРС та знову підсилить струм в обмотці збудження і т. д., поки не встановиться необхідна напруга генератора.

Процес самозбудження і величина сталої напруги холостого ходу

U_0 залежать також від величини опору кола збудження. При холостому ході, якщо обмотка підключена паралельно якорю (рис. 4.15,*а*),

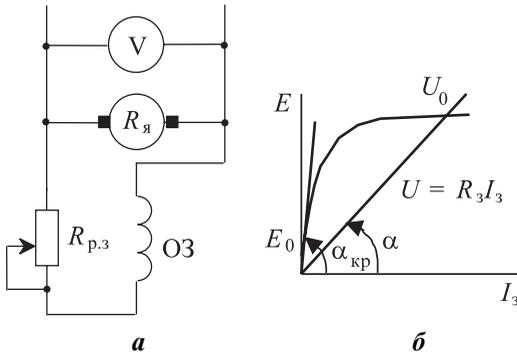


Рис. 4.15

ЕРС, що змінюється по характеристиці холостого ходу, буде долати спадання напруги в резисторі кола збудження та ЕРС самоіндукції обмотки збудження. Процес збудження буде закінчуватися в точці U_0 (див. рис. 4.15,*б*) перетину характеристики холостого ходу $E(I_3)$ і вольт-амперної характеристики $U = R_3 I_3$. Коли ЕРС самоіндукції стане рівною нулю, то, мабуть, при збільшенні опору кола збудження напруга буде збільшуватися, а точка U_0 буде зміщатися по характеристиці холостого ходу до точки E_0 . При деякому опорі R_3 вольт-амперна характеристика буде дотичною до характеристики холостого ходу. Напруга в цьому випадку знизиться, і генератор за даних умов не збудиться. Величина опору, при якому генератор не збуджується, називається *критичним опором кола збудження* і визначається формулою

$$R_{з.кр} = \frac{U_{\min}}{I_{з.кр}} = \operatorname{tg} \alpha_{кр},$$

де U_{\min} – напруга початкової ділянки характеристики холостого ходу.

При зменшенні швидкості обертання вольт-амперна характеристика кола збудження навіть при гранично малому R_3 може стати також дотичною до характеристики холостого ходу, і генератор при цьому не збудиться. Швидкість обертання, при якій генератор не збуджується, називається *критичною швидкістю обертання*.

Таким чином, для самозбудження генератора необхідні наступні умови: а) наявність магнітного поля залишкового намагнічування; б) збіг поля обмотки збудження з полем залишкового намагнічування; в) опір кола збудження повинен бути менший від критичного при даній швидкості обертання.

Відзначимо, що для поліпшення процесу самозбудження треба зовнішнє коло залишати розімкнутим та обертати якір з номінальною швидкістю. Якщо поле залишкового намагнічування мале, то необхідно підмагнітити машину від стороннього джерела. Нарешті, якщо при наявності всіх умов регульовальний реостат виведений цілком і машина не збуджується, то необхідно збільшити швидкість обертання якоря.

4.7.5. Генератор паралельного збудження

Генератор постійного струму, обмотка збудження якого ввімкнена паралельно якорю, називається генератором паралельного збудження. На рис. 4.16 показана його принципова електрична схема.

Напруга на затискачах генератора паралельного збудження визначається формулою

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}}.$$

Струм кола збудження визначається за законом Ома

$$I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

За першим законом Кірхгофа

$$I_{\text{я}} = I + I_3.$$

Характеристика холостого ходу, зовнішня і регульовальна характеристики мають такий же вигляд, як і в генератора незалежного збудження (див. рис. 4.12–4.14), з тією відмінністю, що навантажувальна характеристика йде трохи нижче, а регульовальна – трохи вище. Це пояснюється зменшенням струму збудження по мірі зростання струму навантаження, а також тим, що при одному і тому ж навантаженні струм у якорі генератора паралельного збудження більший, ніж у генератора незалежного збудження.

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рис. 4.17) показує,

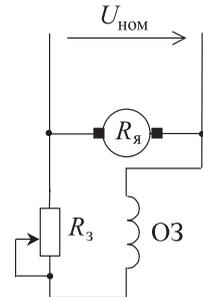


Рис. 4.16

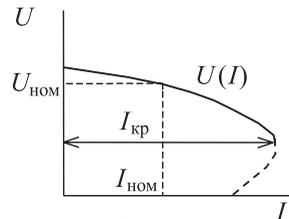


Рис. 4.17

що напруга на його затискачах при збільшенні навантаження зменшується. Це зменшення напруги викликається: 1) збільшенням спадання напруги $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ в обмотці якоря внаслідок зростання струму якоря; 2) зменшенням ЕРС генератора за рахунок посилення дії подовжньої реакції якоря; 3) зменшенням струму збудження внаслідок зниження напруги, що також викликає зменшення її ЕРС, а отже, і напруги.

Зовнішня характеристика генератора показує також, що при деякому струмі $I = I_{\text{кр}}$, названому *критичним струмом*, подальше зменшення опору зовнішнього кола викликає не збільшення струму навантаження, а його зменшення (пунктирна частина кривої).

Це пояснюється тим, що при значно зниженій напрузі на затискачах струм збудження стає настільки малим, що невелике його зменшення спричиняє різке зменшення ЕРС генератора. Іншими словами, відбувається саморозмагнічування генератора. При короткому замиканні генератор зберігає невелику ЕРС, зумовлену залишковим намагнічуванням, що і підтримує в якорі струм $I_{\text{кр}}$, названий *струмом короткого замикання (критичним)*.

Зменшення напруги при збільшенні навантаження від нуля до номінального в генераторів паралельного збудження становить 8...15 % від $U_{\text{ном}}$, тобто воно більше, ніж у генератора незалежного збудження.

Таким чином, основні властивості генератора паралельного збудження коротко можна сформулювати так: 1) генератор збуджується при розімкнутому зовнішньому колі і не збуджується, якщо він замкнений накоротко або на малий опір, оскільки в останньому випадку струм в обмотку збудження не піде; 2) при зміні навантаження від нуля до номінального напруга генератора зменшується в більшому ступені, ніж у генератора незалежного збудження; 3) для генератора безпечні короткі замикання, тому що струм збудження буде дорівнювати нулю, тобто генератор розмагнітиться, а струм у якорі буде визначатися залишковою ЕРС. Величина сталого струму короткого замикання звичайно менша від номінального струму генератора, і тому його дія безпечна для генератора. Однак раптове коротке замикання генераторів паралельного збудження, особливо великої потужності, може викликати сильне іскріння на колекторі. Це пояснюється відповідним запасом електромагнітної енергії в машині, що спричиняє затягування в часі перехідних процесів.

Генератори паралельного збудження знайшли широке застосування як збудники і зарядні агрегати, а також невеликі джерела живлення.

4.7.6. Генератор послідовного збудження

Генератор постійного струму, обмотка збудження якого ввімкнена послідовно з якорем, називається генератором послідовного збудження. На рис. 4.18,*а* показана його електрична схема.

При роботі генератора

$$I_{\text{я}} = I_3 = I;$$

$$U = E - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{сн}}),$$

де $R_{\text{сн}}$ – опір серієсної (послідовної) обмотки збудження ОЗС.

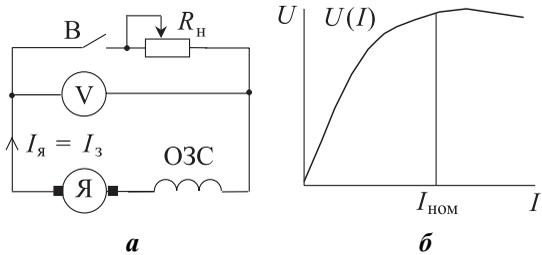


Рис. 4.18

Зовнішня характеристика генератора наведена на рис. 4.18,*б*. Вона показує, що напруга на затискачах генератора спочатку зростає по мірі зростання навантаження, потім досягає найбільшого значення. Унаслідок зростання спаду напруги в обмотках якоря і збудження підсилююча дія реакції якоря зменшується. Напруга генератора при зміні навантаження змінюється в широких межах. Тому генератори послідовного збудження застосовуються лише як спеціальні генератори.

4.7.7. Генератор змішаного збудження

Генератор постійного струму, що має паралельну і послідовну обмотки збудження, називається *генератором змішаного збудження*. На рис. 4.19 показана його електрична схема. Паралельна обмотка ОЗШ призначена для створення основного потоку машини, а послідовна ОЗС для підтримки стабільності напруги на затискачах генератора при зміні навантаження. Дійсно, при збільшенні навантаження зростає струм у послідовній обмотці, у ре-

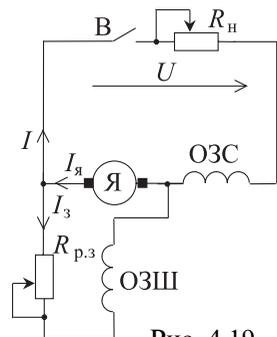


Рис. 4.19

зультаті чого збільшується магнітне поле генератора і, отже, компенсується зменшення напруги генератора, викликане збільшенням струму якоря. Завдяки цьому напруга на затискачах генератора при зміні навантаження від нуля до номінального залишається майже незмінною, що наочно показує зовнішня характеристика (крива 1 на рис. 4.20,а).

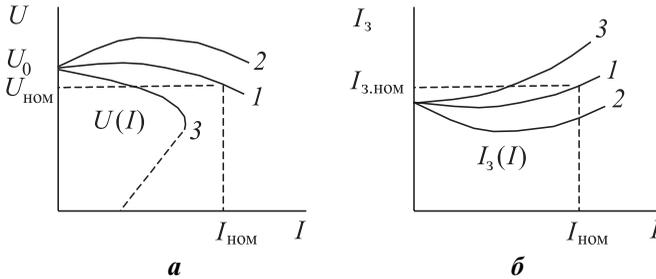


Рис. 4.20

У тих же випадках, коли потрібна сталість напруги на затискачах споживача, для компенсації спадання напруги й у мережі послідовну обмотку роблять посиленою. Зовнішня характеристика для цього випадку зображена кривою 2. Таким чином, послідовна обмотка є автоматичним регулятором напруги.

При роботі генератора змішаного збудження, коли його обмотки збудження з'єднані згідно (компаундно) і їхні потоки $\Phi_{ш}$ та $\Phi_{сн}$ складаються, мають місце наступні співвідношення:

$$I_{я} = I + I_3; \quad U = E - I_{я}(R_{я} + R_{сн}); \quad E = c_e n (\Phi_{ш} + \Phi_{сн}).$$

Оцінка величини напруги перекомпаундованого генератора проводиться ступенем перекомпаундування

$$m = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\text{ном}}},$$

де ΔU_{\max} – максимальний приріст напруги, вищий від номінальної; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга машини.

У ряді випадків застосовується зустрічне, або протикомпаундне, з'єднання обмоток генератора, при якому магнітний потік послі-

довної обмотки послабляє потік, створюваний паралельною обмоткою. Зовнішня характеристика при цьому стає крутопадаючою (крива 3 на рис. 4.20, *a*). Таке з'єднання застосовується при роботі генератора (наприклад, зварювальної машини) в умовах частих перевантажень або коротких замикань. У цих випадках послідовна обмотка майже розмагнічує машину і знижує струм до значення, безпечного для цілості генератора.

На рис. 4.20, *б* показані регульовальні характеристики генератора змішаного збудження. Крива 1 відповідає машині з нормальною послідовною обмоткою, крива 2 – з підсиленою, а крива 3 – зустрічному включенню обмоток збудження. Ці характеристики є дзеркальним відображенням зовнішніх характеристик генератора.

Генератор змішаного збудження має такі властивості: 1) збуджується як при розімкнутому, так і при замкнутому зовнішньому колі; 2) при зміні навантаження від нуля до номінального напруга генератора за умови згідного включення обмоток практично залишається незмінною, а при зустрічному різко змінюється; 3) при згідному включенні обмоток збудження для генератора небезпечно коротке замикання, тому що послідовна обмотка підтримує напругу на затискачах генератора, унаслідок чого процес затягується і струм короткого замикання досягає небезпечних значень для цілості машини. Навпаки, при зустрічному включенні обмоток збудження для генератора безпечно коротке замикання, тому що послідовна обмотка розмагнічує машину.

Генератори змішаного збудження мають добрі властивості, тому широко застосовуються як основні джерела постійного струму та перетворювачі.

4.8. Електродвигуни постійного струму

Електродвигуни постійного струму за способом збудження, як і генератори, поділяються на чотири типи: незалежного, паралельного, послідовного і змішаного збудження. На рис. 4.10 показані схеми збудження електродвигунів.

Електродвигуни незалежного збудження застосовуються тільки в спеціальних установках, а всі інші застосовуються достатньо широко.

Основні умови роботи електродвигунів виражаються рівняння-

ми рівноваги ЕРС і моментів:

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}; \quad M = M_{\text{гл}},$$

де $M_{\text{гл}}$ – гальмівний момент, який на валу електродвигуна складається з моментів: холостого ходу, створеного силами тертя; навантаження, що створюється зовнішніми силами; сил інерції обертових частин.

Електродвигуни працюють при переході від одного режиму до іншого стійко без спеціальних регуляторів, необхідних, наприклад, для дизелів. Іншими словами, електродвигун саморегулюється. Активні моменти можуть як перешкоджати, так і сприяти руху, тобто вони зберігають свій напрямок при зміні напрямку обертання якоря. Прикладом активного моменту може бути момент піднімально-го механізму, зокрема піднімальної стріли.

4.8.1. Пуск у хід і зупинка електродвигунів

Пуск у хід електродвигунів постійного струму в принципі може бути здійснений трьома способами: прямим вмиканням у мережу, введенням пускового реостата в коло якоря та зміною напруги джерела живлення за допомогою спеціальних перетворювачів.

З рівняння ЕРС впливає, що струм у якорі електродвигуна

$$I = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_e n \Phi}{R_{\text{я}}}.$$

У перший момент пуску, коли $n = 0$, ЕРС електродвигуна $E = c_e n \Phi = 0$ і, оскільки $R_{\text{я}}$ малий, струм якоря досягає дуже великих значень:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} = (10 \dots 50) I_{\text{ном}}.$$

Природно, що такий струм викликає сильне іскріння на колекторі і великий динамічний момент на валу електродвигуна, а також створює великий спад напруги в мережі живлення. Тому спосіб пуску прямим вмиканням у мережу застосовується тільки для невеликих електродвигунів, коли пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ не перевищує значення $(4 \dots 6) I_{\text{ном}}$ і безпечний для цілості електродвигуна.

Для обмеження пускового струму в коло якоря включається спе-

ціальний пусковий реостат (рис. 4.21). При цьому пусковий струм визначається формулою

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}},$$

де $R_{\text{пуск}}$ – опір пускового реостата, який підбирають так, щоб пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ не перевищував значень $(1,5 \dots 2)I_{\text{ном}}$.

При вмиканні електродвигуна в мережу його якор починає обертатися, поступово збільшуючи швидкість. Унаслідок цього зворотна ЕРС починає збільшуватись, пусковий реостат повільно виводять і наприкінці пуску повністю виключають з кола якоря. При цьому зворотна ЕРС досягає значення, близького до напруги мережі, а струм зменшується до нормальної величини. На рис. 4.22 наведений вигляд кривої пускового струму. Оскільки пусковий реостат має кілька ступенів, то і зміна пускового струму відбувається ступенями. Відповідно до ступенів зміни струму буде змінюватися і швидкість обертання якоря, досягаючи наприкінці пуску свого сталого значення.

Пуск електродвигунів значно поліпшується, якщо він проводиться при максимальній величині магнітного потоку. Для цього реостат у колі збудження перед пуском повністю виводиться. Крім того, схема електродвигуна повинна бути зібрана так, щоб струм збудження не залежав від струму якоря. Тому обмотка збудження завжди включається на незалежне живлення від джерела.

Зупинка електродвигуна здійснюється швидким уведенням пускового реостата з наступним відключенням від джерела живлення.

4.8.2. Регулювання швидкості обертання електродвигунів

Швидкість, або кутова швидкість обертання (частота обертання), якоря електродвигуна визначається з рівняння зворотної елек-

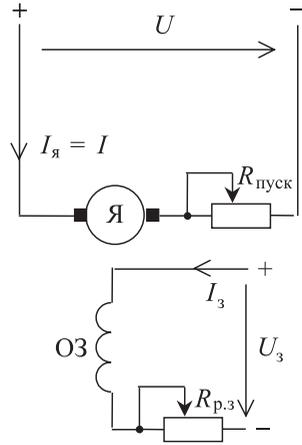


Рис. 4.21

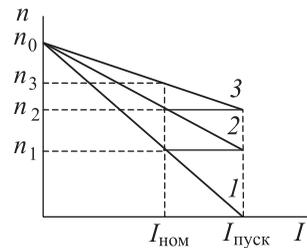


Рис. 4.22

трорушійної сили:

$$n = \frac{E}{c_e \Phi}.$$

Замінивши в цьому рівнянні ЕРС її значенням $E = U - R_{я} I_{я}$, отримаємо

$$n = \frac{U - R_{я} I_{я}}{c_e \Phi}.$$

З цього виразу виходить, що регулювати частоту обертання електродвигуна можна зміною напруги, підведеної до якоря, або зміною магнітного потоку електродвигуна.

Зміна напруги, підведеної до якоря, здійснюється за допомогою спеціального перетворювача або найчастіше – регулювальним реостатом, включеним послідовно в коло якоря. Реостат дозволяє регулювати швидкість обертання в бік зниження від номінальної. При цьому частота обертання електродвигуна визначиться за рівнянням

$$n = \frac{U - (R_{я} + R_{р.я}) I_{я}}{c_e \Phi},$$

де $R_{р.я}$ – опір регулювального реостата.

Зміна магнітного потоку в електродвигуні проводиться регулювальним реостатом у колі збудження. Зміна опору кола збудження викликає зміну струму збудження i , отже, магнітного потоку машини. Цей спосіб дозволяє регулювати швидкість обертання в бік підвищення.

Регулювання швидкості обертання реостатом в колі якоря не економічне, тому що в регулювальному реостаті втрачається значна потужність. Навпаки, регулювання реостатом у колі збудження економічне, тому що потужність, що втрачається в реостаті, незначна.

4.8.3. Реверс і гальмування електродвигунів

Під реверсом розуміється зміна напрямку обертання якоря електродвигуна. Останнє залежить від напрямку струму в обмотці якоря і в обмотці збудження. Тому реверс електродвигуна можна здійснити зміною напрямку струму в обмотці збудження при незмінному

напрямку струму в якорі або зміною напрямку струму в якорі при незмінному напрямку струму в обмотці збудження. Якщо ж одночасно змінити напрямок струму в якорі та в обмотці збудження, то напрямок обертання якоря не зміниться. Зміна напрямку струму в якорі звичайно здійснюється за допомогою контролера або автоматичних апаратів – контакторів, а в обмотці збудження – за допомогою реверсивних реостатів або реверсивних контакторів. На рис. 4.23 зображена можлива схема реверсування електродвигунів.

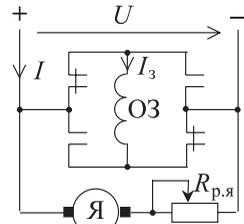


Рис. 4.23

Гальмування електродвигунів застосовується для їх швидкої зупинки. Знаходять застосування наступні способи гальмування: механічне, рекуперативне, електродинамічне та противключення. Найбільшого поширення набули електричні методи гальмування.

Механічне гальмування здійснюється за допомогою колодкових, стрічкових або дискових гальм. Зокрема, дискове електромагнітне гальмо (рис. 4.24) сконструйоване так: на вал 1 електродвигуна надітий гальмовий диск 2. До нього під дією пружини 6 притискається гальмовий башмак 3, що є якорем електромагніта 4, і цим здійснюється гальмування електродвигуна. При наявності струму в котушці 5 електромагніта ярір 3, стискаючи пружину 6, відходить від гальмового диска і електродвигун розгальмовується.

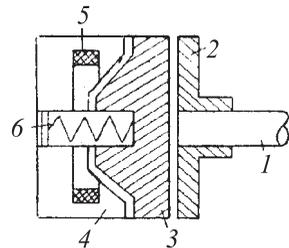


Рис. 4.24

Електродинамічне гальмування здійснюється так: обертовий ярір електродвигуна відключається від мережі і замикається на реостат $R_{гп}$ (рис. 4.25); при цьому ярір, продовжуючи обертатися по інерції в магнітному полі, розвиває протиелектрорушійну силу, що створює струм зворотного напрямку

$$I_{гп} = \frac{-E}{R_{я} + R_{гп}}.$$

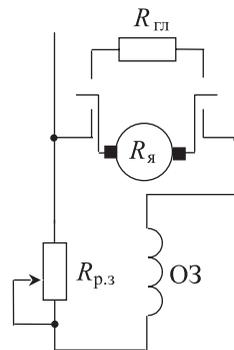


Рис. 4.25

Цей струм називається *гальмівним* струмом. Від взаємодії даного струму з основним магнітним полем електродвигун швидко зупиняється.

Рекуперативне, або гальмування з віддачею енергії в мережу, як і динамічне, здійснюється переведенням машини в режим генератора. Таке гальмування звичайно застосовується для машин паралельного та змішаного збудження і в тих випадках, коли на валу електродвигуна замість гальмівного моменту створюється обертаючий, наприклад при спуску вантажу стрілою. У результаті при збільшенні швидкості обертання машини збільшується і зворотна ЕРС якоря, а коли $E > U$, машина переходить у режим генератора, віддаючи енергію в мережу і розвиваючи гальмівний момент на валу. Для збільшення гальмівного моменту часто застосовують форсування збудження.

Гальмування противключенням здійснюється зміною полярності живлення обмотки обертового якоря. При цьому електродвигун по інерції або під дією зовнішнього моменту обертається в ту ж сторону, а обертаючий електромагнітний момент протидіє йому. Зворотна ЕРС E машини та напруга живлення U спрямовані згідно, і струм може досягти значної величини. Тому послідовно з якорем включається спеціальний опір $R_{\text{гл}}$, що обмежує величину гальмівного струму

$$I_{\text{гл}} = \frac{-E}{R_{\text{я}} + R_{\text{гл}}}.$$

Такий спосіб звичайно застосовується для інтенсивного гальмування з наступним реверсуваням електродвигуна на ходу.

4.8.4. Характеристики електродвигунів постійного струму

Властивості електродвигунів постійного струму оцінюються за *робочими і регульовальними характеристиками*. Робочі характеристики являють собою наступні залежності:

$$n, M, I, \eta = f(P_2) \quad \text{при } U = \text{const} \text{ і } R_3 = \text{const},$$

де n – частота обертання якоря; M – обертаючий момент на валу електродвигуна; I – струм, споживаний електродвигуном з мережі;

η – коефіцієнт корисної дії електродвигуна; P_2 – корисна потужність, тобто потужність на валу електродвигуна.

Оскільки $P_2 = UI\eta$, тобто корисна потужність електродвигуна пропорційна струму, робочі характеристики іноді подають у вигляді залежностей: $n, M, P_2, \eta = f(I)$ при $U = \text{const}$ і $R_3 = \text{const}$.

Характеристику $n = f(P_2)$ часто називають *швидкісною* (або *зовнішньою*) *характеристикою електродвигуна*.

Під регульовальними характеристиками розуміються залежності вигляду $n = f(I_3)$ при $U = \text{const}$. Ці характеристики визначають можливості і способи регулювання швидкості електродвигунів.

Оцінка властивостей електродвигунів у загальному випадку робиться також за механічними характеристиками, які являють собою залежності $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ і $R_3 = \text{const}$. Ці характеристики використовуються при аналізі електричних приводів.

4.8.5. Електродвигуни паралельного збудження

Електродвигун постійного струму, обмотка збудження якого включена паралельно якорю, називається *електродвигуном паралельного збудження*. На рис. 4.26 зображена його електрична схема. На схемі позначені: Я – якір; ОЗШ – обмотка збудження шунтова; $R_{\text{пуск}}$ – пусковий реостат; $R_{\text{р.з}}$ – регульовальний реостат у колі збудження. Схема передбачає, що при будь-якому положенні коло збудження залишається замкнутим як при пуску електродвигуна, так і під час його роботи. Якщо цього не передбачити, то при обриві кола збудження магнітний потік зменшиться до величини залишкового магнітного потоку і електродвигун не зможе розвинути момент достатньої величини. У результаті при пуску під навантаженням електродвигун не рушить з місця, струм якоря досягне величини струму короткого замикання і якір може вийти з ладу.

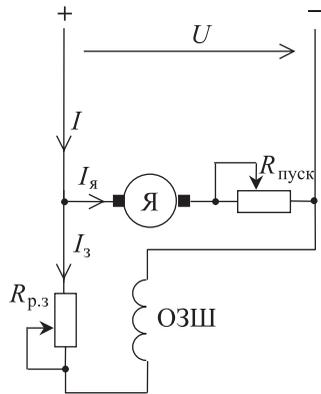


Рис. 4.26

Приклад 4.1. Генератор незалежного збудження має такі номінальні дані: $P_{\text{ном}} = 20$ кВт, $U_{\text{ном}} = 230$ В. Опір кола збудження $R_3 = 15,7$ Ом, опір обмоток якоря (включаючи опір обмоток додат-

кових полюсів та опір щіток) $R_{\text{я}} = 0,17$ Ом, потужності втрат у сталі і механічні $p_{\text{с}} + p_{\text{мех}} = 0,95$ кВт.

Визначити ЕРС генератора E , напругу на затискачах генератора і його ККД (реакцію якоря нехтуємо) при навантаженнях β , що становлять $5/4$, $4/4$, $2/4$ і $1/4$ від номінального. Побудувати графіки залежностей $U = f_1(\beta)$ і $\eta = f_2(\beta)$.

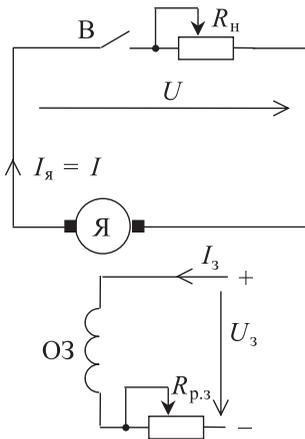


Рис. 4.27

Розв'язання. Для генератора незалежно-го збудження, принципова схема якого показана на рис. 4.27, ЕРС

$$E = U + R_{\text{я}} I_{\text{я}}.$$

При номінальному режимі

$$I_{\text{я}} = I_{\text{я.ном}} \quad \text{і} \quad U = U_{\text{ном}};$$

$$I_{\text{я.ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 20 \cdot 10^3 / 230 = 87 \text{ А.}$$

Тоді

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} + R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}} = 244,8 \text{ В.}$$

Отже,

$$E = U + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 244,8 \text{ В.}$$

Напруга на затискачах генератора при $\beta = 5/4$

$$U_1 = E - \beta R_{\text{я}} I = 244,8 - (5/4) \cdot 87 \cdot 0,17 = 226,3 \text{ В.}$$

Аналогічно одержуємо:

$$U_2 = 230 \text{ В; } U_3 = 233,7 \text{ В; } U_4 = 237,4 \text{ В; } U_5 = 241,1 \text{ В.}$$

ККД генератора дорівнює відношенню потужності, яка віддається, до потужності споживаної:

$$\eta = \frac{\beta P_{\text{ном}}}{\beta P_{\text{ном}} + P_3 + \beta^2 R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}}^2 + p_{\text{мех}} + p_{\text{с}}} =$$

$$= 1 - \frac{P_3 + \beta^2 R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}}^2 + p_{\text{мех}} + p_{\text{с}}}{\beta P_{\text{ном}} + P_3 + \beta^2 R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}}^2 + p_{\text{мех}} + p_{\text{с}}},$$

де $P_3 = U^2 / R_3 = 110^2 / 15,7 = 0,77$ Вт – потужність утрат в обмотці збудження; $R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}}^2 = 0,17 \cdot 87^2 = 1285$ Вт = 1,285 кВт – потужність утрат у яркній обмотці при $\beta = 1$.

При $\beta = 5/4$

$$\eta_1 = 1 - \frac{0,77 + (5/4)^2 \cdot 1,285 + 0,95}{(5/4) \cdot 20 + 0,77 + (5/4)^2 \cdot 1,285 + 0,95} = 1 - 0,129 = 0,871.$$

Аналогічно одержуємо:

$$\eta_2 = 0,87; \quad \eta_3 = 0,86;$$

$$\eta_4 = 0,81; \quad \eta_5 = 0,73.$$

Графіки залежностей $U = f_1(\beta)$ і $\eta = f_2(\beta)$ показані на рис. 4.28.

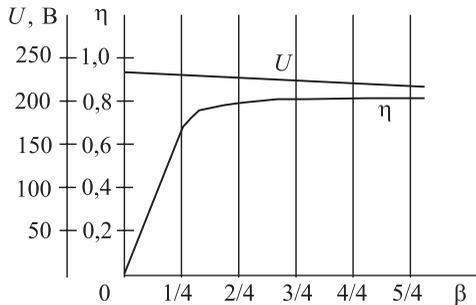


Рис. 4.28

Приклад 4.2. Генератор паралельного збудження має такі номінальні дані: $P_{\text{ном}} = 11,3$ кВт; $U_{\text{ном}} = 115$ В. Потужності втрат: $P_3 = 700$ Вт; $P_{\text{я}} = 800$ Вт; $p_{\text{мех}} + p_{\text{с}} = 600$ Вт.

Визначити: опір кола збудження R_3 ; опір обмотки якоря $R_{\text{я}}$; ЕРС $E_{\text{ном}}$ якоря при номінальному навантаженні генератора; струм короткого замикання $I_{\text{к}}$, якщо залишковий магнітний потік складе 3% від його номінального значення. Швидкість обертання якоря n постійна.

Принципова схема генератора паралельного збудження наведена на рис. 4.29.

Розв'язання. Опір кола збудження

$$R_3 = U_{\text{ном}}^2 / P_3 = 115^2 / 700 = 18,9 \text{ Ом.}$$

Опір обмотки якоря

$$R_{\text{я}} = P_{\text{я}} / I_{\text{я.ном}}^2,$$

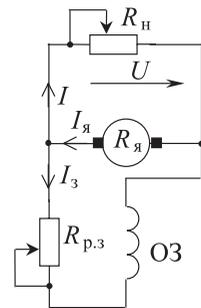


Рис. 4.29

де $I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} + I_3 = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} + P_3 / U_{\text{ном}} = 104,4 \text{ А}$ – номінальне значення струму якоря.

Отже, $R_{\text{я}} = 0,0735 \text{ Ом}$.

При постійній швидкості обертання якоря n ЕРС

$$E = c_e n \Phi = k \Phi; \quad E / E_{\text{ном}} = \Phi / \Phi_{\text{ном}},$$

де $E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} + R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}} = 115 + 104,4 \cdot 0,0735 = 122,6 \text{ В}$.

За умовою задачі магнітний потік Φ складає 3 % від $\Phi_{\text{ном}}$.
Отже, $E_{\text{к}}$ складе 3 % від $E_{\text{ном}}$.

Тому

$$I_{\text{я}} = (E - U) / R_{\text{я}} = I_{\text{я.к}} = E_{\text{к}} / R_{\text{я}} = (0,03 \cdot 122,6) / 0,0735 = 50 \text{ А}.$$

При короткому замиканні $U = 0$.

Приклад 4.3. Електродвигун постійного струму паралельного збудження має такі номінальні дані: $P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $\eta_{\text{ном}} = 86 \%$, $n_{\text{ном}} = 2250 \text{ об/хв}$. Потужність утрат двигуна $P_3 = 5 \%$, а $P_{\text{я}} = 4,6 \%$ від споживаної номінальної потужності.

Визначити: величину опору пускового реостата для пуску двигуна пусковим струмом, що у два рази перевищує своє номінальне значення; величину номінального електромагнітного обертаючого моменту $M_{\text{ном}}$; величину пускового обертаючого моменту $M_{\text{пуск}}$, вважаючи, що магнітний потік залишається без зміни; швидкість обертання двигуна, якщо він працює як генератор, віддаючи за умови $U_{\text{дв}} = U_{\text{г}}$ в мережу потужність $P_{\text{ном}}$.

Розв'язання. Для двигуна паралельного збудження (рис. 4.30) справедливе співвідношення

$$U_{\text{ном}} = E_{\text{ном}} + R_{\text{я}} I_{\text{я.ном}},$$

де $E_{\text{ном}}$ – проти-ЕРС, яка індукується в обмотці якоря при номінальній швидкості обертання.

Номінальний струм якоря

$$I_{\text{я.ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - E_{\text{ном}}}{R_{\text{я}}}.$$

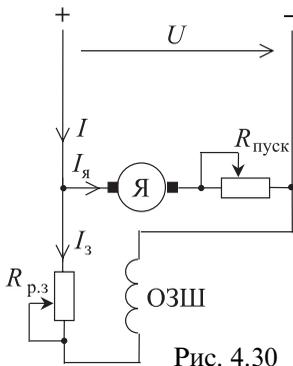


Рис. 4.30

У момент пуску $n=0$. Отже, $E=0$, тому пусковий струм якоря буде надмірно великим. Для його обмеження послідовно з якорем включають пусковий реостат $R_{\text{пуск}}$.

Тоді

$$I_{\text{я.пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}},$$

звідки

$$R_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я.пуск}}} - R_{\text{я}}.$$

Потужність, споживана двигуном з мережі,

$$P_{\text{Iном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{10}{0,86} = 11,6 \text{ кВт.}$$

Номінальний струм двигуна

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{Iном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{11,6 \cdot 10^3}{220} = 53 \text{ А.}$$

Струм збудження

$$I_3 = \frac{P_3 P_{\text{Iном}}}{100 U_{\text{ном}}} = \frac{5 \cdot 11,6 \cdot 10^3}{100 \cdot 220} = 2,64 \text{ А.}$$

Номінальний струм якоря

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} - I_3 = 53,0 - 2,64 \approx 50,4 \text{ А.}$$

Опір обмотки якоря

$$R_{\text{я}} = \frac{P_{\text{я}} P_{\text{Iном}}}{100 I_{\text{я.ном}}^2} = \frac{4,6 \cdot 11,6 \cdot 10^3}{100 \cdot 50,4^2} = 0,212 \text{ Ом.}$$

Опір пускового реостата

$$R_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я.пуск}}} - R_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ном}}}{2I_{\text{я.ном}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2 \cdot 50,4} - 0,212 = 1,97 \text{ Ом.}$$

При включенні без пускового реостата пусковий струм у якорі

$$I'_{\text{я.пуск}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}} = 220 / 0,212 = 1040 \text{ А,}$$

тобто в 20,6 рази більший від номінального, що неприпустимо.

Обертаючий електромагнітний момент двигуна при номінальному режимі

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \frac{10 \cdot 10^3}{2250} = 42,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пусковий обертаючий момент визначимо, використавши залежність обертаючого моменту від магнітного потоку Φ і струму якоря $I_{\text{я}}$:

$$M_{\text{ном}} = c_M \Phi I_{\text{я}}.$$

Оскільки за умовою магнітний потік постійний, а пусковий струм у два рази більший від номінального, то і пусковий момент буде в два рази перевищувати номінальний:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} (I_{\text{я.пуск}} / I_{\text{я.ном}}) = 84,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Якщо двигун працює як генератор, його номінальний струм

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 10 \cdot 10^3 / 220 = 45,4 \text{ А.}$$

Струм у якорі

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} + I_3 = 45,4 + 2,64 \approx 48 \text{ А.}$$

ЕРС

$$E_{\text{Г}} = U + R_{\text{я}} I_{\text{я.Г}}; \quad E_{\text{ДВ}} = U - R_{\text{я}} I_{\text{я.ДВ}}.$$

Струм у колі збудження в обох випадках однаковий, тому що за умовою $U_{\text{дв}} = U_{\text{г}}$. Використовуючи лінійну залежність ЕРС від швидкості обертання, одержуємо

$$E_{\text{дв}} = c_e \Phi n_{\text{дв}}; \quad E_{\text{г}} = c_e \Phi n_{\text{г}},$$

звідки

$$n_{\text{г}} = n_{\text{дв}} \frac{E_{\text{г}}}{E_{\text{дв}}} = 2250 \frac{220 + 48 \cdot 0,212}{220 - 50,4 \cdot 0,22} = 2470 \text{ об/хв.}$$

5. СИНХРОННІ МАШИНИ

5.1. Призначення і будова синхронних машин

Синхронні машини використовуються як генератори, двигуни і синхронні компенсатори. Установлені на теплових електростанціях генератори, що приводяться в обертання паровими турбінами, називаються турбогенераторами. Синхронні генератори гідроелектростанцій, які обертаються за допомогою гідротурбін, звуться гідро-генераторами. Крім електростанцій синхронні генератори знаходять застосування в установках, що вимагають автономного джерела електроенергії. Прикладом можуть бути автомобільні електричні крани, на яких синхронні генератори приводяться в обертання двигунами внутрішнього згоряння.

Синхронний компенсатор являє собою машину, призначену для підвищення коефіцієнта потужності електротехнічних установок.

Трифазні синхронні генератори, двигуни і синхронні компенсатори мають у принципі однакову будову. На рис. 5.1 показана будова синхронної машини з неявновираженими полюсами (а) і ротора машини з явновираженими полюсами (б).

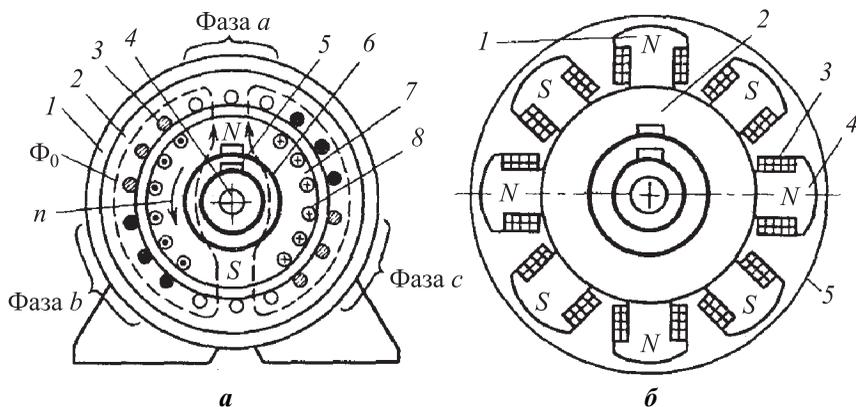


Рис. 5.1

Нерухома частина машини (статор) складається зі сталевого або чавунного корпусу 1, у якому закріплений циліндричний сердечник 2. Для зменшення втрат на перемагнічування і вихрові струми його на-

бирають з листів електротехнічної сталі. У пазах сердечника статора вкладається трифазна обмотка 3, що виконана так само, як і обмотка статора асинхронних двигунів. Сердечник статора в сукупності з обмоткою називається якорем машини. У підшипникових щитах, прикріплених з торцевих сторін до корпусу, або в стояках, закріплених на фундаменті, розташовані підшипники, що несуть вал 4 обертової частини машини – ротора. Синхронні генератори гідроелектростанцій виконують звичайно з вертикальним розташуванням вала. На валу розміщений циліндричний сердечник 7 ротора, виконаний із суцільної сталі. У пазах сердечника ротора вкладається обмотка збудження 8, що живиться постійним струмом. Для приєднання обмотки збудження до зовнішнього електричного кола на валу закріплюють два ізольовані одне від одного і від вала контактні кільця 6, до яких пружинами притискаються нерухомі щітки 5. Обмотка 8 призначена для збудження основного магнітного поля машини.

Живлення обмотки збудження здійснюється від генератора постійного струму (збудника), вал якого з'єднаний з валом синхронної машини, від напівпровідникового перетворювача змінного струму в постійний або від інших джерел постійного струму. Потужність для живлення обмотки збудження становить 1...3 % потужності машини.

На рис. 5.1,*а* показаний розріз дво полюсної синхронної машини з неявновираженими полюсами ротора. Такі машини виготовляють на частоти обертання 3000, 1500 і 1000 об/хв. Машини, призначені для роботи з меншими частотами обертання (750, 600, 500 об/хв і т. д.), мають явновиражені полюси, число яких тим більше, чим менша частота обертання. На рис. 5.1,*б* показаний ротор восьми полюсної машини з явновираженими полюсами. Ротор вписаний в окружність 5, що являє собою умовно внутрішню окружність сердечника статора. Явновиражені полюси 1 виготовляють масивними зі сталевих листів і закріплюють на валу 2 ротора. Вал ротора в сукупності з явновираженими полюсами являє собою сердечник ротора. Окремі котушки обмотки збудження 3, розташовані на явновиражених полюсах, з'єднані між собою так, що північні і південні полюси чергуються. Трифазна обмотка якоря синхронних машин виконується таким чином, що збуджуване нею обертове магнітне поле має таке ж число полюсів, як ротор.

У пристроях автоматики, вимірювальної техніки, запису і від-

творення звуку застосовуються синхронні двигуни малої потужності (мікродвигуни).

5.2. Принцип дії синхронних машин

5.2.1. Принцип дії генератора

Якщо обмотку збудження генератора підключити до джерела постійного струму, то МРС обмотки створить основне магнітне поле, що характеризується магнітним потоком Φ_0 і показане на рис. 5.1,а за допомогою двох ліній магнітної індукції, зображених пунктиром. При обертанні ротора за допомогою первинного двигуна магнітне поле буде також обертатися.

Оскільки котушки фаз обмотки якоря мають однакові числа витків і зміщені в просторі одна відносно одної на 120° , при обертанні магнітного поля в трьох фазах будуть індукуватися три ЕРС, однакові за амплітудою і частотою та зміщені за фазою одна відносно одної також на кут 120° . Щоб при постійній частоті обертання ЕРС змінювалися за законом, близьким до синусоїдального, магнітна індукція вздовж повітряного зазору, що розділяє магнітопроводи статора і ротора, повинна бути розподілена також приблизно за синусоїдальним законом. У машинах з явновираженими полюсами це досягається за рахунок неоднакового повітряного зазору між сердечником статора і полюсними наконечниками 4 (див. рис. 5.1,б), у машинах з неявновираженими полюсами – за рахунок відповідного розподілу обмотки збудження по пазах сердечника статора.

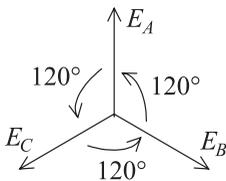


Рис. 5.2

Векторна діаграма ЕРС генератора показана на рис. 5.2. Діюче значення і частота синусоїдальної ЕРС, що індукується у фазі обмотки якоря, можуть бути визначені, як і в асинхронному двигуні, за формулами

$$E_0 = 4,44k\omega f\Phi_0; \quad f = \frac{pn}{60}.$$

Для одержання стандартної частоти 50 Гц при різних частотах обертання синхронні генератори виготовляються з різними числами пар полюсів. Так, турбогенератори виготовляються в більшості випадків на частоту обертання 3000 об/хв і мають одну пару полю-

сів ($p = 1$). Виготовлення турбогенераторів на найменше число пар полюсів і відповідно на найбільшу частоту обертання дозволяє зменшити габаритні розміри, масу і вартість генераторів. Частота обертання гідрогенераторів визначається в основному висотою напору води і для різних станцій лежить у межах 50...750 об/хв, що відповідає числам пар полюсів від 60 до 4.

Якщо до обмотки якоря підключити приймач електричної енергії, то під дією ЕРС у фазах обмотки якоря і приймача з'являться струми; генератор почне віддавати приймачу електричну енергію.

При роботі генератора з навантаженням МРС трифазної обмотки якоря збуджує обертове магнітне поле якоря, що характеризується магнітним потоком $\Phi_{\text{я}}$, частота обертання якого дорівнює частоті обертання ротора, тобто $n_0 = n = 60f/p$; взаємне розташування осей магнітних полів якоря і ротора при даному навантаженні генератора залишається незмінним.

Під дією поля якоря результуюче поле генератора при зміні його навантаження буде також змінюватися, що впливає в остаточному підсумку на значення напруги генератора. Вплив поля якоря на результуюче поле машини називається *реакцією якоря*.

У результаті взаємодії магнітного потоку якоря $\Phi_{\text{я}}$ і провідників обмотки збудження (або полюсів намагнічених сердечників якоря і ротора) на ротор діє електромагнітний момент, що спрямований у генератора проти напрямку частоти обертання ротора і є гальмівним.

Значення електромагнітного моменту, інтенсивність та характер дії реакції якоря залежать крім значення струму якоря також і від характеру опору приймачів. Мається на увазі те, що при зміні характеру опорів приймачів змінюється взаємне розташування осей магнітних потоків $\Phi_{\text{я}}$ і Φ_0 .

На рис. 5.3,*a* наведений ескіз спрощеної моделі синхронної машини, на якому кожна фаза обмотки якоря замінена одним витком; ротор обертається з частотою обертання n під дією первинного двигуна; магнітне поле якоря показане для випадку, коли струм фази ax має максимальне значення, унаслідок чого вісь KK' поля якоря $\Phi_{\text{я}}$ перпендикулярна до площини котушки фази ax ; вісь mm' магнітного поля ротора Φ_0 збігається з віссю KK' поля якоря, що відповідає випадку, при якому ЕРС фази ax відстає від струму цієї фази на

кут 90° . Останнє можливе при власне ємнісному навантаженні генератора, якщо не враховувати активний опір фази ax .

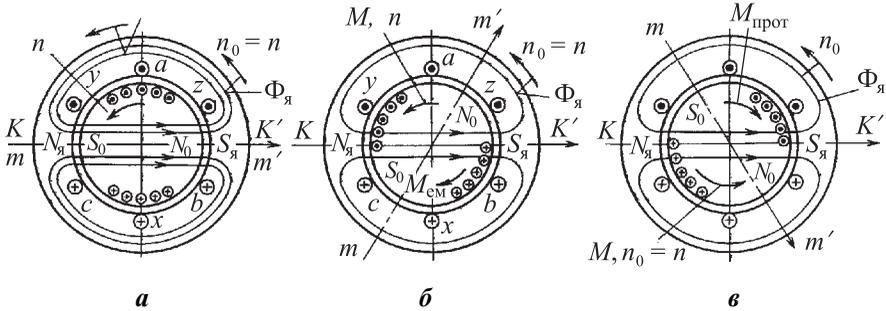


Рис. 5.3

Неважко встановити, що, незважаючи на наявність струму якоря і магнітного потоку $\Phi_{я}$, при власне ємнісному навантаженні електромагнітний момент генератора дорівнює нулю, під дією поля якоря генератор підмагнічується.

Можна показати, що і при власне індуктивному навантаженні генератора електромагнітний момент також дорівнює нулю. Тільки в цьому випадку полем якоря генератор буде розмагнічуватися.

Якщо при тих же струмах якоря навантаження буде активно-ємнісним, взаємне розташування осей магнітних потоків зміниться: вісь mm' магнітного потоку ротора зміститься на деякий кут у напрямку обертання ротора (див. рис. 5.3,б). Унаслідок цього на ротор почне діяти гальмівний електромагнітний момент $M_{ем}$, у чому легко переконатися за допомогою правила лівої руки (або розглянувши взаємодію полюсів намагнічених сердечників якоря і ротора). Як видно, при активно-ємнісному навантаженні поле якоря має складову, що підмагнічує генератор.

У випадку активно-індуктивного навантаження також виникає гальмівний момент, а поле якоря розмагнічує генератор.

Схема генератора показана на рис. 5.4. До обмотки збудження ОЗГ подають постійний струм від невеликого генератора-збуджувача З. Найчастіше він приводиться в дію тим же первинним двигуном, що і генератор.

Первинний двигун обертає ротор генератора ОЗГ з постійною частотою обертання n_0 . При цьому магнітний потік збудження, ство-

рений електромагнітами ротора, перетинає фазні обмотки статора ОС та індукуює в них ЕРС, зміщені за фазою на 120° . Якщо до затисків статора приєднати навантаження Z , то в обмотках будуть струми, які створюють трифазне обертове магнітне поле. Частота обертання цього поля дорівнює частоті обертання ротора, тому машина і називається синхронною. Число пар полюсів обмотки статора дорівнює числу пар полюсів ротора. Фазні обмотки статора, як правило, з'єднують зіркою, тому що ЕРС і струми гармонік, кратних трьом, знищуються.

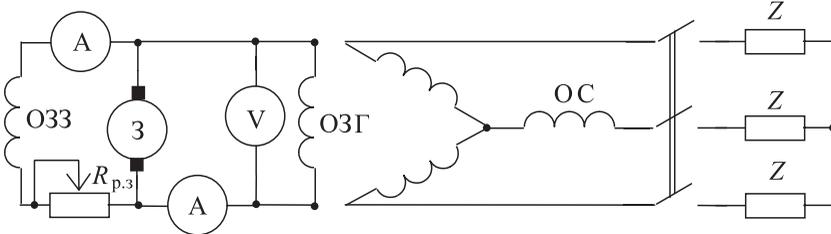


Рис. 5.4

5.2.2. Принцип дії двигуна

При роботі синхронної машини як двигуна обмотка якоря підключається до джерела трифазного струму, у результаті чого виникає обертовий магнітний потік $\Phi_{\text{я}}$. Після розгону ротора до частоти обертання n , близької до частоти обертання n_0 поля якоря, його обмотка збудження підключається до джерела постійного струму і виникає магнітний потік Φ_0 . Завдяки взаємодії магнітного потоку $\Phi_{\text{я}}$ і провідників обмотки ротора (або полюсів намагнічених сердечників якоря та ротора) виникає обертаючий електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$, що діє на ротор, і він утягується в синхронізм, тобто починає обертатися з частотою обертання, рівною частоті обертання n_0 магнітного поля якоря.

Положення осі mm' магнітного поля ротора щодо осі KK' поля якоря і значення моменту $M_{\text{ем}}$ залежать від навантаження двигуна. Так, при роботі двигуна в режимі ідеального холостого ходу ротор займає положення, показане на рис. 5.3,а, при якому електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ дорівнює нулю. Деякому механічному навантаженню двигуна відповідає положення ротора, зображене на рис. 5.3,в, якому відповідає певний обертаючий момент $M_{\text{ем}}$.

Значення струму якоря, інтенсивність і характер дії реакції якоря залежать при $M_{\text{ем}} = \text{const}$ від ЕРС E_0 , що визначається величиною струму збудження. Варто помітити тільки, що, коли двигун споживає від джерела тільки індуктивну або активно-індуктивну потужність, під дією поля якоря двигун підмагнічується (див. рис. 5.3, а, в); у випадку споживання ємнісної або активно-ємнісної потужності двигун під дією поля якоря розмагнічується.

Як і в інших машинах, у синхронних електромагнітний момент незначно відрізняється від моменту, що розвивається машиною на валу. Тому для простоти аналізу будемо вважати їх надалі рівними і позначати M .

Істотною особливістю синхронного двигуна на відміну від асинхронного є те, що обертаючий момент виникає в нього в тому випадку, коли частота обертання ротора n дорівнює частоті обертання n_0 магнітного поля якоря. Це пояснюється тим, що струм в обмотці збудження синхронного двигуна з'являється не в результаті електромагнітної індукції (як в обмотці ротора асинхронного двигуна), а внаслідок живлення обмотки збудження від стороннього джерела постійного струму.

Частота обертання магнітного поля якоря, а отже і ротора синхронного двигуна, визначається за формулою $n_0 = n = 60f/p$.

Для одержання різних частот обертання синхронні двигуни виготовляють з різними числами полюсів. При частоті $f = 50$ Гц частоти обертання будуть 3000, 1500, 1000, 750 об/хв і т. д.

5.3. Явище реакції якоря

5.3.1. Реакція якоря генератора

У процесі роботи навантаженого синхронного генератора в ньому діють дві намагнічувальні сили (НС): обмотки збудження F_3 і обмотки статора (якоря) $F_я$.

Намагнічувальна сила обмотки збудження F_3 створює магнітне поле Φ_3 збудження. Але при підключенні навантаження сили F_3 і $F_я$ взаємодіють та створюють результуюче магнітне поле, що відрізняється від поля обмотки збудження. Цей процес взаємодії НС обмотки збудження і НС обмотки якоря називається *реакцією якоря*.

Синхронні генератори працюють на змішане навантаження. Для з'ясування питання про вплив реакції якоря на роботу синхронної

машини доцільно розглянути випадки роботи генератора при активному, індуктивному та ємнісному навантаженнях. При побудові векторних діаграм варто мати на увазі те, що ЕРС E_1 , індукована магнітним потоком обмотки збудження в обмотці генератора, відстає від вектора потоку Φ_3 . Струм статора I_1 може займати будь-яке положення відносно вектора E_1 в залежності від характеру навантаження.

Активне навантаження

Побудуємо векторну діаграму при активному навантаженні (рис. 5.5). Відкладаємо вектор потоку обмотки збудження Φ_3 . Під кутом 90° до цього вектора будуємо в бік відставання вектор ЕРС E_1 , наведеної в обмотці статора полем обмотки збудження.

При активному навантаженні струм I_1 і E_1 збігаються за фазою, і тому вектор Φ_y , створений струмом I_1 , зміщений у просторі відносно вектора Φ_3 на 90° . Результуючий магнітний потік $\Phi_0 = \sqrt{\Phi_3^2 + \Phi_y^2}$.

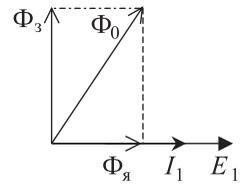


Рис. 5.5

Індуктивне навантаження

При індуктивному навантаженні генератора струм обмотки статора I_1 відстає від ЕРС E_1 на кут 90° (рис. 5.6).

При цьому магнітний потік Φ_y діє по осі полюсів ротора зустрічно потоку Φ_3 .

Отже, *реакція якоря* в синхронному генераторі при власне індуктивному навантаженні носить поздовжньо-розмагнічуючий характер. Результуючий магнітний потік $\Phi_0 = \Phi_3 - \Phi_y$.

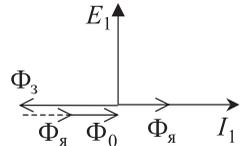


Рис. 5.6

Ємнісне навантаження

Векторна діаграма синхронного генератора для ємнісного навантаження показана на рис. 5.7. Струм I_1 при ємнісному навантаженні випереджає ЕРС E_1 на 90° . При цьому магнітний потік Φ_y діє по осі полюсів та збігається з потоком Φ_3 , відбувається посилення поля: $\Phi_0 = \Phi_3 + \Phi_y$.

При власне ємнісному навантаженні реакція якоря носить поздовжньо-намагнічуючий характер.

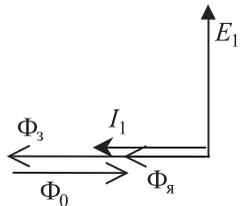


Рис. 5.7

5.3.2. Синхронний опір машини

При активному навантаженні генератора існує тільки поперечний потік статора, а при індуктивному та ємнісному виникає тільки подовжній потік статора Φ , обумовлений реактивним струмом статора.

У цих випадках крім потоку, що замикається через ротор, існують силові лінії, які замикаються тільки навколо провідників секцій обмотки статора та утворюють потік магнітного розсіювання $\Phi_{\text{роз}}$.

Оскільки силові лінії потоку розсіювання проходять значну частину свого шляху в повітрі, то можна вважати, що цей потік пропорційний струму статора і збігається з ним за фазою. Потік розсіювання індуктує в обмотці статора ЕРС розсіювання $E_{\text{роз}}$, що відстає від потоку розсіювання за фазою на кут 90° . Частина основної ЕРС, яка компенсує ЕРС розсіювання, є індуктивним спадом напруги в статорі $X_{\text{роз}}I = -E_{\text{роз}}$, де $X_{\text{роз}}$ – індуктивний опір статора.

Інша частина ЕРС статора йде на компенсацію ЕРС, що індукується потоком статора Φ . Якщо не враховувати насичення сталі, то цей потік пропорційний струму статора і можна виразити ЕРС, що компенсує реакцію статора, через додатковий індуктивний спад напруги IX , де X умовно береться за індуктивний опір, еквівалентний дії реакції статора. Отже, повний індуктивний спад напруги в статорі

$$I(X_{\text{роз}} + X) = IX_{\text{сх}},$$

де $X_{\text{сх}}$ – синхронний індуктивний опір статора (для ненасиченої машини $X_{\text{сх}}$ – стала величина).

5.4. Векторні діаграми

Діаграми будують для однієї фази, оскільки передбачається, що навантаження фаз симетричне.

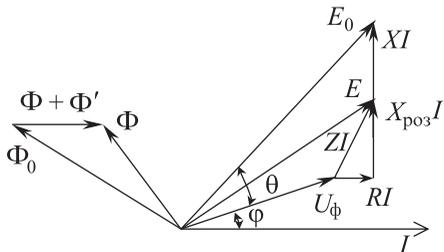


Рис. 5.8

Побудуємо повну діаграму для найбільш типового випадку, коли навантаження генератора має змішаний характер (активно-індуктивна). Початковим вектором для побудови діаграми є вектор струму у фазах статора (рис. 5.8). Вектор фазної напру-

ги U_ϕ випереджає вектор струму I на кут ϕ , величину якого можна знайти за значенням опору приймача:

$$\phi = \arctg \frac{X_H}{R_H}.$$

До кінця вектора напруги паралельно струму відкладаємо активний спад напруги у фазній обмотці статора RI і перпендикулярно – індуктивний спад напруги в тій же обмотці $X_{\text{роз}}I$. Гіпотенуза ZI отриманого трикутника є повним спадом напруги у фазній обмотці статора. Якщо кінець вектора ZI з'єднати з початком діаграми, то одержимо вектор ЕРС E , індукований результируючим потоком машини Φ . Перпендикулярно до струму від кінця вектора E будуюмо вектор XI індуктивного спаду напруги, що компенсує реакцію статора. З'єднавши кінець цього вектора з початком діаграми, отримаємо вектор ЕРС E_0 , індукований потоком збудження при холостому ході. У бік випередження E_0 на кут 90° будуюмо вектор магнітного потоку Φ_0 , а від його кінця паралельно струму проводимо вектор потоку, що дорівнює сумі потоків $\Phi + \Phi'$. Результируючий потік машини повинен випереджати ЕРС E на кут 90° .

Активний опір обмоток статора в порівнянні з індуктивним дуже малий, тому для спрощення розрахунків ним можна знехтувати. Тоді векторна діаграма спрощується (рис. 5.9). Кут між E_0 і U_ϕ визначає ступінь завантаження генератора. Так, при холостому ході цей кут дорівнює нулю, а при навантаженні він збільшується.

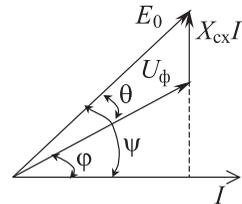


Рис. 5.9

5.5. Характеристики генератора

Характеристика холостого ходу синхронного генератора (рис. 5.10,а) являє собою графічно зображену залежність ЕРС від струму збудження при відсутності навантаження і незмінній швидкості обертання, що відповідає номінальній частоті струму: $E = f(I_3)$ при $I = 0$ і $n_0 = \text{const}$.

У сучасних насичених синхронних машинах вона має вигляд кривої намагнічування сталі.

Зовнішня характеристика синхронного генератора – це залежність напруги на затискачах від струму навантаження при постій-

них значеннях струму збудження, номінальної швидкості і коефіцієнта потужності.

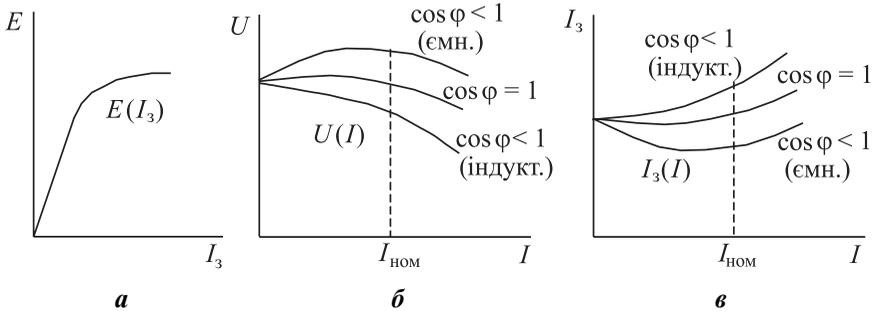


Рис. 5.10

Напряга на затискачах генератора при навантаженні зменшується в порівнянні з ЕРС холостого ходу E_0 унаслідок дії реакції якоря і спадання напруги в обмотці статора. Різниця $E_0 - U$ називається *змінною напругою*, яку відносять до номінальної напруги і виражають у відсотках. Номінальна зміна напруги

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{E_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \%$$

При активному навантаженні ($\cos \varphi = 1$) напруга на затискачах статора зменшується внаслідок зростання спаду напруги в активному та індуктивному опорах статора (див. рис. 5.10, б). Якщо $\cos \varphi < 1$, характеристика проходить нижче при індуктивному характері навантаження і вище – при ємнісному. Це пояснюється зміною результуючого потоку від дії подовжньої складової потоку статора.

Регульовальні характеристики синхронного генератора – це залежності струму збудження генератора від струму навантаження при постійних значеннях напруги на затискачах, номінальної швидкості обертання і $\cos \varphi$: $I_3 = f(I)$ при $U = \text{const}$; $n_0 = \text{const}$; $\cos \varphi = \text{const}$.

Генератори живлять приймачі, нормальна робота яких вимагає постійної за величиною напруги, що не залежить від навантаження. Підтримка постійної напруги здійснюється зміною струму збудження. Для цього призначений регульовальний реостат у колі збуджен-

ня збудника. При активному та індуктивному навантаженнях струм збудження збільшують, а при ємнісному зменшують (див. рис. 5.10,б).

5.6. Паралельна робота генератора

Вмикання на паралельну роботу генераторів змінного струму здійснюють більш складним шляхом, ніж генераторів постійного струму. На суднових електростанціях установлюють однотипні генератори, що мають приблизно однакові зовнішні характеристики. Генератори підключають однаковими фазами до шин електростанції, що перевіряється при монтажі.

При кожному вмиканні синхронного генератора паралельно з мережею необхідно, щоб його ЕРС у будь-який момент була однаковою за величиною і протилежною за напрямком напрузі мережі. З цієї умови виходить, що діючі значення ЕРС генератора, який вмикається, і напруга мережі та частоти повинні бути однаковими, а фази – протилежними.

Процес приведення генераторів у такий стан, при якому всі зазначені умови будуть виконані, називається *синхронізацією генераторів*. Якщо генератори синхронізовані, то вмикання їх на паралельну роботу з мережею проходить плавно, поштовху струму не виникає. Недотримання хоча б однієї з цих умов супроводжується появою між генераторами значних зрівняльних струмів, що можуть викликати пошкодження машин.

Рівність ЕРС генератора і напруги мережі досягається регулюванням струму збудження генератора та перевіряється вольтметром. Збіг частот забезпечується регулюванням швидкості обертання первинного двигуна і перевіряється частотоміром. Цим же способом досягається стан повної синхронізації, що перевіряється синхроскопом.

Стрілковий синхроскоп, застосовуваний на суднових електростанціях, – це сельсин, у якого статорна обмотка через додатковий резистор приєднується до генератора, що підключається, а роторна обмотка підключена до мережі. Трифазне обертове магнітне поле статора сельсина взаємодіє з полем ротора, у результаті чого останній починає рухатися зі швидкістю, пропорційною різниці частот мережі і генератора. Якщо частоти однакові і ЕРС генератора, що підключається, знаходиться в протифазі з напругою мережі, то

ротор сельсина нерухомий, а стрілка його встановлюється в нульове положення. У цей момент генератор підключають до шин для подальшої паралельної роботи.

Розрізняють три види синхронізації: точну, самосинхронізацію і грубу. Кожна з них може здійснюватися вручну, напівавтоматично та автоматично.

Точна синхронізація генераторів уручну є складною, тривалою і відповідальною операцією, що вимагає досить високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. При встановленні на електростанції спеціальних пристроїв-синхронізаторів можна здійснювати точну синхронізацію автоматично.

За методом самосинхронізації генератор у збудженому стані розганяють первинним двигуном до підсинхронної швидкості, при якій його частота на один-два періоди відрізняється від частоти на шинах, потім підключають до шин і негайно дають йому збудження. Для перевірки величини частоти синхронізуючого генератора його збуджують перед підключенням до шин, потім швидко знімають збудження, включають автоматичний вимикач генератора і знову збуджують до попередньої величини. Після вмикання генератора на шини він сам утягується в синхронізм. Швидкість утягування генератора в синхронізм залежить від швидкості наростання магнітного потоку ротора. У самозбудних генераторах через швидкодію системи саморегулювання тривалість утягування в синхронізм і глибина провалу напруги менші, ніж у звичайних генераторів. Вмикання методом самосинхронізації супроводжується короткочасним поштовхом струму, що звичайно не перевищує триразове значення номінального струму і тому безпечно для генераторів.

При грубій синхронізації збуджений генератор доводять до підсинхронної швидкості і потім вмикають. Для зм'якшення поштовху струму послідовно з обмотками статора вмикають індуктивні котушки з неферромагнітним сердечником (реактори). Після втягування генератора в синхронізм реактори шунтують. Груба синхронізація не вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, і сам пуск нетривалий, особливо в самозбудних генераторів. В останньому випадку поштовх струму в статорі форсує струм збудження. Громіздкість реакторів, що вмикаються в кожен фазу статора, трохи знижує ефект грубої синхронізації.

5.7. Розподіл навантаження при паралельній роботі

Після вмикання синхронного генератора на паралельну роботу на нього переводять навантаження, збільшуючи обертаючий момент його первинного двигуна шляхом зміни подачі палива або пари; одночасно на стільки ж зменшують момент працюючого генератора.

Для забезпечення стійкої паралельної роботи з рівномірним розподілом загального навантаження між генераторами необхідно дотримувати певні умови.

Розподіл активного навантаження між окремими генераторами відбувається в залежності від виду швидкісних характеристик первинних двигунів. При зміні сумарного навантаження від 20 до 100 % активне навантаження повинне розподілитися з точністю $\pm 10\%$ від номінальної потужності даного генератора. Регулюючи механічну потужність, що надходить від первинних двигунів до генераторів, тобто збільшуючи або зменшуючи кількість підведеного палива чи пари, розподіляють активне навантаження між генераторами. Для підтримки постійної напруги на шинах електростанції при переведенні активного навантаження з одного генератора на інший потрібно збільшити обертаючий момент другого первинного двигуна і зменшити відповідно момент у першого. Необхідно прагнути до того, щоб активне навантаження розподілялося між генераторами пропорційно їхнім номінальним потужностям.

Розподіл реактивного навантаження між генераторами здійснюється шляхом зміни струму збудження. У кожного з генераторів, увімкнених на паралельну роботу, струм збудження повинен бути таким, щоб коефіцієнти потужності окремих генераторів були однакові. За цією умовою відсутні зрівняльні струми між генераторами, що спричиняють додаткові втрати і нагрів обмоток.

При паралельній роботі самозбудних генераторів з компаундуванням їхні роторні обмотки повинні бути з'єднані між собою паралельно за допомогою вирівняльних шин. При відсутності таких шин випадкове збільшення ЕРС одного з генераторів може викликати зрівняльний струм статора, що, у свою чергу, приведе до збільшення струму збудження і ще більшого зростання ЕРС і т. д. Це продовжується доти, поки не спрацює захисна апаратура під дією великого зрівняльного струму. Якщо є вирівняльні шини, то збільшення ЕРС одного генератора спричиняє збільшення струму збудження у всіх генераторів.

Розглянемо, як впливає зміна збудження на роботу генератора в різних режимах.

На рис. 5.11,а побудована векторна діаграма для генератора, що підключений до мережі і працює вхолосту. Вектор ЕРС E_0 збігається за величиною і фазою з напругою генератора U_Γ та знаходиться в протифазі з напругою мережі $U_{\text{мер}}$.

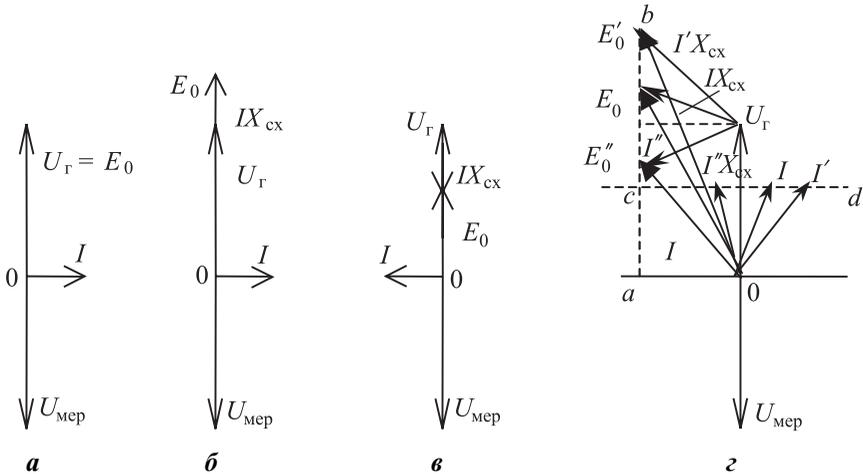


Рис. 5.11

Якщо збільшити струм збудження, то збільшиться магнітний потік ротора і ЕРС E_0 стане більшою від $U_\Gamma = -U_{\text{мер}}$. Під впливом надлишкової ЕРС у кожній фазній обмотці статора виникає зрівняльний струм, що є суто реактивним. Цей струм направляєтся в мережу і намагнічує інші машини, у тому числі і генератор, що працює з даним генератором паралельно. Таким чином, генератор виробляє реактивну потужність, що надходить у мережу. Зрівняльний струм, будучи реактивним, не робить перерозподілу активного навантаження (див. рис. 5.11,б). Струм статора відстає за фазою від спаду напруги $IX_{\text{сх}}$ на 90° .

При недозбудженні генератора ЕРС менша від $U_{\text{мер}}$ і для повного намагнічування машини з мережі надходить реактивна потужність. При цьому в статорі протікає зрівняльний струм, що також є реактивним, але, на відміну від попереднього випадку, він направлений діаметрально протилежно (див. рис. 5.11,в).

Припустимо, що генератор підключений до мережі з нескінченно великою потужністю, тобто $U_{\text{мер}} = \text{const}$. Побудуємо спрощену векторну діаграму, що відповідає деякому активному навантаженню генератора (див. рис. 5.11,з). При активному навантаженні між E_0 і U_r треба визначити кут зміщення фаз ϕ . Якщо змінювати струм збудження, то активне навантаження не змінюється і активний струм I_a має постійну величину. Тоді проекція вектора спаду напруги IX_{cx} , що дорівнює відрізку $0a$, також постійна:

$$0a = IX_{\text{cx}} \cos \alpha = I_a X_{\text{cx}} = \text{const}.$$

При зміні струму збудження вектор ЕРС буде змінювати свою величину і фазу, але кінець вектора при цьому ковзає по вертикалі ab , проведеної через точку a . З діаграми (див. рис. 5.11,з) ясно, що при збудженні ($E'_0 > E_0$) генератор працює з відстаючим струмом I' , а при недозбудженні ($E''_0 < E_0$) – з випереджаючим струмом I'' . Оскільки струм завжди відстає від вектора спаду напруги IX_{cx} на кут 90° , то кінець вектора цього струму при зміні збудження ковзає по лінії cd , тому що активний струм залишається незмінним.

З діаграми можна знайти залежність $I = f(I_3)$ при $P = \text{const}$ і $U_r = \text{const}$. Побудувавши такі залежності для різних активних навантажень, одержимо У-подібні криві (рис. 5.12). Для кожного навантаження існує таке збудження, при якому $\cos \phi = 1$ та $I = I_a$. Очевидно, що в цьому випадку втрати генератора будуть найменшими. На рис. 5.12 побудована також залежність $\cos \phi = f(I_3)$ для одного випадку. Якщо на паралельну роботу ввімкнені генератори однакової потужності, то найвигідніший режим роботи відповідає однаковим активним і реактивним потужностям.

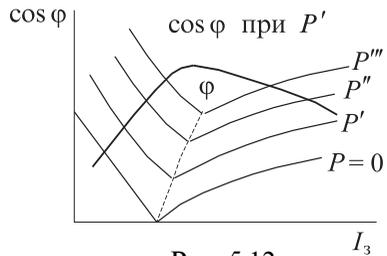


Рис. 5.12

5.8. Робота трифазної синхронної машини в режимі двигуна

Трифазні синхронні машини мають властивість оборотності, тобто можуть без зміни своєї конструкції працювати в режимі генератора і двигуна.

Схема вмикання синхронного двигуна показана на рис. 5.13.

При цьому обмотка статора підключається до трифазної мережі змінного струму, що забезпечує збудження магнітного поля, яке обертається із синхронною частотою обертання $n_0 = 60f/p$, а обмотка збудження підключається до випрямляча або збудника, що приводить до встановлення в ній постійного струму і збудження магнітного поля ротора. Однак синхронну машину з нерухомим збудженим ротором не можна запустити двигуном, якщо обмотку статора підключити безпосередньо до трифазної мережі змінного струму, тому що при цьому обертове магнітне поле статора буде поперемінно взаємодіяти з різнойменними полюсами ротора. Ротор має значний момент інерції і піддається рівним за величиною та протилежним за напрямком механічним поштовхам, у результаті чого він залишиться нерухомим. З цієї причини ротору необхідно надати початкову швидкість, близьку або рівну швидкості обертання магнітного поля статора.

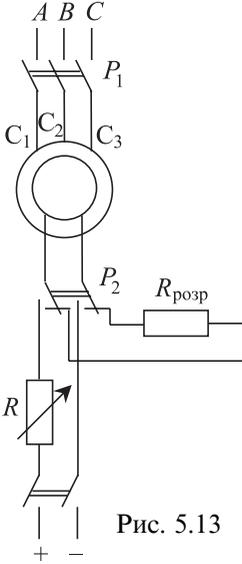


Рис. 5.13

Сучасні синхронні двигуни мають на роторі короткозамкнену обмотку, розгін здійснюється так, як і асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Для збільшення пускового моменту $M_{\text{пуск}}$ до значень $(0,85 \dots 1,25)M_{\text{ном}}$, зменшення величини перенапруги в обмотці ротора при пуску, а також для скорочення часу розгону до підсинхронної швидкості $\Omega' = 0,95\Omega_0$ обмотку ротора замикають на розрядний резистор $R_{\text{розр}} = (6 \dots 12)R_2$, де R_2 – опір обмотки ротора.

5.9. Гальмування синхронних двигунів

Електричне гальмування синхронних двигунів здійснюють, відключаючи обмотку статора від мережі і замикаючи її на гальмівний опір $R_{\text{розр}}$ (див. рис. 5.13). У цьому випадку машина працює в генераторному режимі за рахунок кінетичної енергії, накопиченої при обертанні; відбувається динамічне гальмування.

5.10. Утрати і ККД синхронних машин

Утрати синхронної машини складаються з механічних $p_{\text{мех}}$ (на тертя в підшипниках, ротора об повітря, щіток об кільця, вентиляційні втрати); утрат у сталі статора на гістерезис і вихрові струми p_c ; утрат в обмотках статора $p_{\text{м1}}$ та в обмотках ротора $p_{\text{м2}}$. Є додаткові втрати p_d , пов'язані з дією потоків розсіювання, витисненням струму і т. д. Механічні втрати, втрати в роторі і в сталі статора постійні й не залежать від навантаження; втрати в обмотці статора і додаткові – це змінні втрати.

Потужність, що віддається генератором у мережу, при тому самому струмі залежить від $\cos \phi$ приймача. У зв'язку з цим номінальною потужністю генератора вважається його повна потужність, виражена в кіловольт-амперах (кВ·А).

Коефіцієнт корисної дії обчислюють за формулами:
для генератора

$$\eta_{\text{г}} = \left(1 - \frac{\sum p}{3UI \cos \phi + \sum p} \right) \cdot 100\%;$$

для двигуна

$$\eta_{\text{дв}} = \left(1 - \frac{\sum p}{3UI \cos \phi} \right) \cdot 100\%,$$

де $\sum p$ – сумарні втрати.

Для машин потужністю від 10 до 100 кВ·А $\eta = 0,85 \dots 0,90$.

Приклад 5.1. Визначити струм і напругу генератора, якщо активна та індуктивна потужності його навантаження $P = 3500$ кВт, $Q = 1500$ квар, ЕРС $E = 6,72$ кВ, активний та синхронний індуктивний опори якоря $R_{\text{я}} = 0,14$ Ом, $X_{\text{я}} = 2$ Ом. Обмотка якоря з'єднана зіркою.

Розв'язання. Розрахунок будемо робити для одної фази. Визначимо фазну ЕРС:

$$E_0 = \frac{E}{\sqrt{3}} = \frac{6,72}{1,73} = 3,88 \text{ кВ.}$$

Повна потужність навантаження

$$S_{\phi} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{3} = \frac{\sqrt{3500^2 + 1500^2}}{3} = 1270 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Коефіцієнт потужності навантаження

$$\cos \varphi = \frac{P}{3S_{\phi}} = 0,92; \quad \sin \varphi = \frac{Q}{3S_{\phi}} = 0,39.$$

Фазну напругу визначимо за формулою

$$U = E_{\phi} - \Delta U,$$

де $\Delta U = (R_{я} \cos \varphi + X_{я} \sin \varphi) I_{\phi} = 0,93 I_{\phi}$.

З рівняння $S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} = 1270 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ знаходимо, що $I_{\phi} = \frac{1270}{U_{\phi}}$.

Фазна напруга $U = E_{\phi} - 0,93 \frac{1270}{U_{\phi}}$.

Знаходимо $U_{\phi} = 3,55 \text{ кВ}$.

Лінійна напруга генератора

$$U = \sqrt{3} U_{\phi} = 6,15 \text{ кВ}.$$

При з'єднанні обмоток зіркою лінійний струм

$$I = I_{\phi} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = 358 \text{ А}.$$

6. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Тестове завдання № 1

1. Указати вираз для визначення діючого значення ЕРС, індукованої в первинній обмотці трансформатора основним магнітним полем.

1. $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$. 2. $e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt}$. 3. $E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$.

4. $E_1 = f w_1 \Phi_m$. 5. $e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 90^\circ)$.

2. Визначити первинний номінальний струм трифазного трансформатора, що має такі паспортні дані: $S = 10$ кВ·А; $U_1 = 6,3$ кВ; $U_2 = 0,4$ кВ; $U_k = 5,5$ %; $I_0 = 10$ %; $P_0 = 105$ Вт; $P_k = 335$ Вт.

1. 12,76 А. 2. 25 А. 3. 1,58 А. 4. 0,92 А. 5. 14,4 А.

3. Чому дорівнює ковзання асинхронної машини в момент пуску?

1. 0. 2. 1. 3. ∞ . 4. $\frac{60 f_1}{p}$. 5. Інша відповідь.

4. Визначити частоту обертання магнітного поля статора трифазного чотириполюсного асинхронного двигуна при частоті струму 50 Гц.

1. 750 об/хв. 2. 1000 об/хв. 3. 1500 об/хв. 4. 2000 об/хв.

5. Визначити ЕРС, наведену в обмотці якоря генератора постійного струму, якщо $c_e = \frac{pN}{60a} = 8,2$; $n = 800$ об/хв; $\Phi = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Вб.

1. 164 В. 2. 160 В. 3. 250 В. 4. 220 В. 5. Визначити неможливо.

6. Двигун послідовного збудження вмикається на напругу 120 В через пусковий реостат з опором 1,5 Ом. Визначити кратність пускового струму, якщо $I_{\text{ном}} = 40$ А; $R_{\text{я}} = 0,1$ Ом; $R_3 = 0,4$ Ом.

1. 1,5. 2. 2. 3. 6. 4. Визначити неможливо. 5. Інша відповідь.

7. Указати вираз для визначення швидкості обертання p -полюсного ротора трифазного синхронного двигуна, підключеного до мережі із стандартною частотою.

1. $n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c\Phi}$. 2. $n = \frac{60f}{p}$. 3. $n = pf$. 4. $n = \frac{60f}{p}(1-s)$. 5. Інша

відповідь.

Тестове завдання № 2

1. Указати рівняння рівноваги миттєвих значень напруг для первинної обмотки трансформатора при холостому ході.

1. $\dot{U}_{01} = -\dot{E}_{01} + Z_1 \dot{I}_{01}$. 2. $e_{01} = u_{01} + Z_1 i_{01}$. 3. $u_{01} = -e_{01}$.

4. $\dot{U}_{01} = R_1 \dot{I}_{01} + jX_1 \dot{I}_{01}$. 5. $u_{01} = -e_{01} + R_1 i_{01} + L_1 \frac{di_{01}}{dt}$.

2. Визначити вторинний номінальний струм трифазного трансформатора, що має такі паспортні дані: $S = 10$ кВ·А; $U_1 = 6,3$ кВ; $U_2 = 0,4$ кВ; $U_{\text{к}} = 5,5$ %; $I_0 = 10$ %; $P_0 = 105$ Вт; $P_{\text{к}} = 335$ Вт.

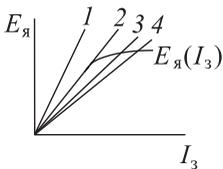
1. 12,76 А. 2. 25 А. 3. 1,58 А. 4. 0,92 А. 5. 14,4 А.

3. Указати вираз для визначення швидкості обертання обертового магнітного поля трифазного асинхронного двигуна.

1. $n_1 = \frac{60f_1}{p}(1-s)$. 2. $n_1 = \frac{60f_1}{p}$. 3. $n_1 = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c\Phi}$. 4. $n_s = n_1 - n_2$.

4. Визначити швидкість обертання ротора трифазного чотириполюсного асинхронного двигуна, який увімкнений до мережі з частотою 50 Гц та працює з ковзанням 0,02.

1. 490 об/хв. 2. 1470 об/хв. 3. 1020 об/хв. 4. 980 об/хв.



5. Серед зображених прямих залежності $I_3 R_3 = f(I_3)$ вказати прямі, що відповідають опорам кола збудження, при яких самозбудження машини постійного струму можливе.

1. 1,2. 2. 3,4. 3. 2. 4. 1. 5. Інша відповідь.

6. Визначити струм навантаження генератора постійного струму з незалежним збудженням, якщо струм його якоря дорівнює 20 А, а струм збудження – 0,1 А.

1. 21 А. 2. 20,1 А. 3. 19,1 А. 4. 20 А. 5. Визначити неможливо.

7. Визначити швидкість обертання обертового магнітного поля двополюсного синхронного генератора, ввімкненого паралельно до мережі із стандартною частотою.

1. 1000 об/хв.
2. 1500 об/хв.
3. 2000 об/хв.
4. 2950 об/хв.
5. 3000 об/хв.

Тестове завдання № 3

1. Трансформатором називають статичний електромагнітний апарат, який перетворює:

1. Електричну енергію однієї частоти на електричну енергію іншої частоти.
2. Змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги при незмінній частоті.
3. Постійний струм на змінний.
4. Електричну енергію на інший вид енергії.
5. Інша відповідь.

2. Визначити струм холостого ходу трифазного трансформатора, що має такі паспортні дані: $S = 10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_1 = 6,3 \text{ кВ}$; $U_2 = 0,4 \text{ кВ}$; $U_{\text{к}} = 5,5 \%$; $I_0 = 10 \%$; $P_0 = 105 \text{ Вт}$; $P_{\text{к}} = 335 \text{ Вт}$.

1. 1,44 А.
2. 25 А.
3. 9,2 А.
4. 0,154 А.
5. 0,092 А.

3. Чому дорівнює швидкість обертання обертового магнітного поля струмів ротора асинхронної машини в момент пуску?

1. 0.
2. n_1 .
3. n_2 .
4. $n_1 - n_2$.
5. Інша відповідь.

4. Визначити ковзання трифазного асинхронного двигуна при стандартній частоті мережі і частоті струмів ротора 2 Гц.

1. 1.
2. 0,01.
3. 0,015.
4. 0,04.
5. Інша відповідь.

5. Чи є потреба виготовляти якорі машини постійного струму із листового заліза з ізоляцією між листами?

1. Потреба є, для зменшення вихрових утрат у якорі.
2. Такої потреби немає, тому що в постійному магнітному потоці втрат на вихрові струми немає.
3. Потреба є, але із суто технологічного боку.

4. Потреба є. Вона викликана поліпшенням умов охолодження якоря машини.

5. Інша відповідь.

6. Визначити струм навантаження генератора постійного струму з паралельним збудженням, якщо струм його якоря дорівнює 20 А, а струм збудження – 0,1 А.

1. 21 А. 2. 19,9 А. 3. 19,1 А. 4. 20 А. 5. Визначити неможливо.

7. Указати вираз для визначення швидкості обертання обертового магнітного поля синхронного генератора.

$$1. n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c\Phi}. \quad 2. n = \frac{60f}{p}. \quad 3. n = \frac{60f}{p}(2-s).$$

Тестове завдання № 4

1. На якому струмі можлива робота трансформатора?

1. Тільки на постійному струмі.
2. На постійному або на змінному струмі.
3. Тільки на змінному струмі.
4. Інша відповідь.

2. Є однофазний двообмотковий трансформатор на номінальну первинну напругу 500 В з кількістю витків первинної обмотки 2000. Яка напруга буде на вторинній обмотці при холостому ході цього ж трансформатора, якщо кількість її витків 440?

1. 0. 2. 220 В. 3. 110 В. 4. 440 В. 5. Інша відповідь.

3. Як зміниться номінальний струм трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, якщо обмотки його статора перемкнуті з трикутника на зірку, а напругу живлення залишити без зміни?

1. Зменшиться в $\sqrt{3}$ раз.
2. Зменшиться в 3 рази.
3. Збільшиться в $\sqrt{3}$ раз.
4. Збільшиться в 3 рази.
5. Залишиться без зміни.

4. Визначити максимальний момент трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при з'єднанні обмоток статора трикутником, якщо відомі паспортні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 20$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220/380$ В; $\eta_{\text{ном}} = 0,89$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,89$; $n_{\text{ном}} = 1440$ об/хв; $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 5$; $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 1,11$; $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2$.

1. 117,6 Н·м. 2. 132,3 Н·м. 3. 147 Н·м. 4. 235,2 Н·м. 5. 265,2 Н·м.

5. Указати дії, необхідні для зміни напрямку обертання двигуна постійного струму.

1. Змінити величину струму якоря або струму збудження.
2. Змінити напрямок струму збудження або струму якоря.
3. Змінити величину струмів якоря та збудження.
4. Змінити напрямки струмів якоря і збудження.
5. Інша відповідь.

6. Визначити струм збудження шунтового генератора, якщо струм його навантаження дорівнює 25 А, а струм якоря – 28 А.

1. 3 А. 2. 25 А. 3. 28 А. 4. 4 А. 5. Визначити неможливо.

7. Визначити швидкість обертання обертового магнітного поля двополосного синхронного двигуна, підключеного до мережі із стандартною частотою.

1. 1000 об/хв. 2. 1500 об/хв. 3. 2950 об/хв. 4. 3000 об/хв.
5. Інша відповідь.

Тестове завдання № 5

1. Указати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для вторинної обмотки трансформатора при короткому замиканні.

1. $\dot{U}_{2к} = Z_k \dot{I}_{2к}$. 2. $\dot{U}_{2к} = Z_2 \dot{I}_{2к}$. 3. $\dot{U}_{2к} = R_k \dot{I}_{2к}$. 4. $U_{2к} = Z_2 i_{2к}$.
5. $u_{2к} = Z_2 i_{2к}$.

2. Визначити вторинний номінальний струм однофазного трансформатора, що має такі паспортні дані: $S = 10$ кВ·А; $U_1 = 6,3$ кВ; $U_2 = 0,4$ кВ; $U_k = 5,5$ %; $I_0 = 10$ %; $P_0 = 60$ Вт.

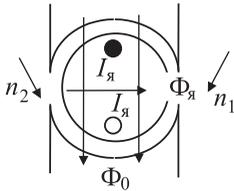
1. 1,59 А. 2. 0,96 А. 3. 15,9 А. 4. 25 А. 5. 250 А.

3. Яким способом змінюють напрямок обертання ротора трифазного асинхронного двигуна?

1. Зміною напруги живлення.
2. Зміною чергування фаз.
3. Зміною ковзання.
4. Зміною числа пар полюсів.

4. Визначити ковзання трифазного чотириполюсного асинхронного двигуна при стандартній частоті мережі і швидкості обертання ротора 1470 об/хв.

1. 0,01. 2. 0,02. 3. 0,2. 4. 0. 5. Інша відповідь.



5. Визначити напрямок обертання якоря двигуна постійного струму для показаних на рисунку напрямків магнітних потоків основних полюсів Φ_0 та реакції якоря $\Phi_{я}$. ● – струм направлено від нас.

1. n_1 . 2. n_2 . 3. Визначити неможливо.

6. Шунтовий двигун з параметрами $I_{я} = 15 \text{ A}$, $R_{я} = 0,5 \text{ Ом}$ вмикається на напругу 120 В. Визначити опір пускового реостата, при якому $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 2$.

1. 0,5 Ом. 2. 3,5 Ом. 3. 30 Ом. 4. 35 Ом. 5. Визначити неможливо.

7. Як можна регулювати швидкість обертання ротора трифазного синхронного двигуна?

1. Зміною напруги.
2. Зміною частоти.
3. Зміною опору в колі збудження.
4. Зміною навантаження.
5. Зміною опору в колі статора.

Тестове завдання № 6

1. Указати рівняння рівноваги миттєвих значень напруг для вторинної обмотки трансформатора при короткому замиканні.

$$1. e_{2к} = R_2 i_{2к} + L_2 \frac{di_{2к}}{dt}. \quad 2. e_{2к} = u_{2к} + Z_2 i_{2к}. \quad 3. e_{2к} = R_к i_{2к}.$$

$$4. \dot{U}_{2к} = Z_2 \dot{I}_{2к}. \quad 5. \dot{U}_{2к} = R_к \dot{I}_{2к}.$$

2. Є однофазний двообмотковий трансформатор на номінальну первинну напругу 500 В з кількістю витків первинної обмотки 2000. Визначити кількість витків вторинної обмотки цього ж трансформатора, потрібну для одержання на її затискачах напруги 227 В при холостому ході.

1. 227. 2. 525. 3. 645. 4. 909. 5. Інша відповідь.

3. Чому дорівнює швидкість обертання обертового магнітного поля асинхронної машини в момент пуску?

1. $60f_1/p$. 2. 0. 3. n_2 . 4. $n_1(1-s)$. 5. Інша відповідь.

4. Визначити частоту струму, індукованого в обмотці ротора трифазного чотириполюсного асинхронного двигуна, який при частоті мережі 50 Гц обертається із швидкістю 1410 об/хв.

1. 50 Гц. 2. 1 Гц. 3. 2 Гц. 4. 3 Гц. 5. Визначити не можна.

5. Для чого призначені додаткові полюси в машині постійного струму?

1. Для компенсації поперечної складової реакції якоря в зоні комутації.

2. Для регулювання швидкості при роботі в режимі двигуна.

3. Для регулювання напруги при роботі в режимі генератора.

4. Для поліпшення умов пуску.

6. Визначити ЕРС якоря шунтового генератора постійного струму, якщо $P_{\text{ном}} = 5,5$ кВт; $R_3 = 88$ Ом; $R_{\text{я}} = 0,2$ Ом; $I_3 = 2,5$ А.

1. 220 В. 2. 229 В. 3. 214,5 В. 4. 225,5 В. 5. 210 В.

7. Указати вираз для визначення швидкості обертання ротора синхронного генератора, якщо p – кількість пар полюсів, f – частота генерованих струмів.

1. $n = pf$. 2. $n = \frac{p}{f}$. 3. $n = \frac{60f}{p}$. 4. $n = \frac{U - R_{\text{я}}I_{\text{я}}}{c\Phi}$.

5. Інша відповідь.

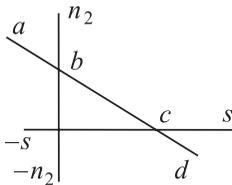
Тестове завдання № 7

1. Указати правильну залежність між дійсним E_2 та зведеним E'_2 значеннями ЕРС вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації k .

1. $E'_2 = \frac{E_2}{k}$. 2. $E'_2 = \frac{E_2}{k^2}$. 3. $E'_2 = kE_2$. 4. $E'_2 = k^2E_2$. 5. $E'_2 = E_2$.

2. Визначити первинний номінальний струм однофазного трансформатора, що має такі паспортні дані: $S = 10$ кВ·А; $U_1 = 6,3$ кВ; $U_2 = 0,4$ кВ; $U_K = 5,5$ %; $I_0 = 10$ %; $P_0 = 60$ Вт.

1. 1,59 А. 2. 0,96 А. 3. 15,9 А. 4. 25 А. 5. 250 А.

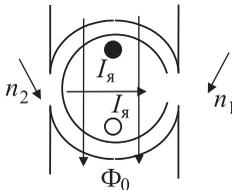


3. На прямій залежності швидкості обертання ротора асинхронної машини від ковзання $n_2 = f(s)$ вказати відрізок, що відповідає гальмівному режиму.

1. ab . 2. bc . 3. cd . 4. ac . 5. bd .

4. Визначити обертальний момент трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при номінальному навантаженні та при з'єднанні обмоток статора зіркою, якщо відомі паспортні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 20$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220/380$ В; $\eta_{\text{ном}} = 0,89$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,89$; $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 5$; $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 2$; $n_{\text{ном}} = 1440$ об/хв.

1. 112,7 Н·м. 2. 117,6 Н·м. 3. 122,5 Н·м. 4. 127,4 Н·м. 5. 132,6 Н·м.



5. При показаних на рисунку напрямках магнітного потоку основних полюсів Φ_0 та струму якоря $I_{\text{я}}$ машини постійного струму визначити напрямок обертання якоря під час роботи машини в генераторному режимі. ● – струм направлено від нас.

1. n_1 . 2. n_2 . 3. Визначити неможливо.

6. Визначити номінальну потужність шунтового генератора постійного струму при відомих параметрах: $U_{\text{ном}} = 110$ В; $I_{\text{я.ном}} = 10$ А; $R_3 = 110$ Ом.

1. 990 Вт. 2. 1100 Вт. 3. 1210 Вт. 4. 919 Вт. 5. 9,9 кВт.

7. Указати вираз для визначення швидкості обертання обертового магнітного поля синхронного двигуна.

1. $n = n_1 s$. 2. $n = pf$. 3. $n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c\Phi}$. 4. $n = \frac{60f}{p}$.

5. Інша відповідь.

Тестове завдання № 8

1. Указати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для первинної обмотки навантаженого трансформатора.

1. $\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_1$. 2. $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_1$. 3. $\dot{U}_1 = (R_1 + jX_1) \dot{I}_1$.
4. $e_1 = -u_1 + Z_1 i_1$. 5. $u_1 = -e_1 + Z_1 i_1$.

2. Визначити коефіцієнт трансформації однофазного знижувального трансформатора, якщо кількості витків його первинної та вторинної обмоток відповідно дорівнюють 300 та 12.

1. 20. 2. 25. 3. 40. 4. 2,5. 5. 2.

3. Чому дорівнює швидкість обертання обертового магнітного поля асинхронної машини при номінальному навантаженні?

1. $n_1(1-s)$. 2. 0. 3. n_2 . 4. $\frac{60f_1}{p}$. 5. Інша відповідь.

4. Визначити обертальний момент трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при номінальному навантаженні та при з'єднанні обмоток статора трикутником, якщо відомі паспортні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 20$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220/380$ В; $\eta_{\text{ном}} = 0,89$; $\cos \phi_{\text{ном}} = 0,89$; $n_{\text{ном}} = 1440$ об/хв.

1. 112,7 Н·м. 2. 117,6 Н·м. 3. 122,5 Н·м. 4. 127,4 Н·м. 5. 132,6 Н·м.

5. Які з перелічених утрат відсутні в машині постійного струму?

1. Утрати в міді обмотки збудження.
2. Утрати в міді обмотки якоря.
3. Утрати на перемагнічення якоря.
4. Утрати на вихрові струми в осерді статора.
5. Утрати на вихрові струми в осерді якоря.

6. Для шунтового генератора задано: $E_{я} = 225$ В; $R_{я} = 0,5$ Ом; $R_3 = 215$ Ом; $I_{я} = 20$ А. Визначити струм збудження генератора.

1. 1,8 А. 2. 1 А. 3. 0,5 А. 4. 2,5 А. 5. Визначити неможливо.

7. Указати вираз для визначення частоти струмів, генерованих синхронним генератором, якщо p – кількість пар полюсів; n – швидкість обертання ротора, об/хв.

1. $f = \frac{p}{n}$. 2. $f = f_1 s$. 3. $f = \frac{pn}{60}(1-s)$. 4. $f = \frac{pn}{60}$. 5. $f = \frac{60p}{n}$.

Тестове завдання № 9

1. Указати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для вторинної обмотки навантаженого трансформатора.

1. $e_2 = u_2 - Z_2 i_2$. 2. $e_2 = u_2 + Z_2 i_2$. 3. $\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + R_2 \dot{I}_2$.
4. $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + Z_2 \dot{I}_2$. 5. $\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + Z_2 \dot{I}_2$.

2. Визначити ЕРС вторинної обмотки трансформатора E'_2 , зведену до кількості витків первинної обмотки, якщо дійсне значення ЕРС вторинної обмотки – 100 В, а коефіцієнт трансформації – 2.

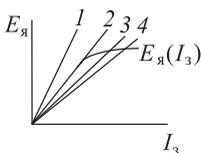
1. 50 В. 2. 100 В. 3. 102 В. 4. 150 В. 5. 200 В.

3. Указати вираз для визначення синхронної швидкості обертання ротора трифазного асинхронного двигуна.

1. $n_1 = \frac{60f_1}{p}$. 2. $n_1 = \frac{60f_1}{p}(1-s)$. 3. $n_1 = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c\Phi}$. 4. $n_s = n_1 - n_2$.

4. Визначити максимальний момент асинхронного двигуна при напрузі, зниженій відносно номінальної напруги на 5 %, якщо максимальний момент цього самого двигуна при номінальній напрузі дорівнює 100 Н·м.

1. 90 Н·м. 2. 95 Н·м. 3. 100 Н·м. 4. 110 Н·м. 5. Інша відповідь.



5. Серед зображених на рисунку прямих залежностей $I_3 R_3 = f(I_3)$ вказати прямі, що відповідають опорам кола збудження, при яких самозбудження машини постійного струму неможливе.

1. 3, 4. 2. 3. 3. 4. 4. 1, 2. 5. Інша відповідь.

6. Шунтовий двигун вмикається через пусковий реостат з опором $1,95 \text{ Ом}$ на напругу 220 В . Визначити відношення пускового струму до номінального $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$, якщо $I_{\text{ном}} = 52,2 \text{ А}$; $R_3 = 110 \text{ Ом}$; $R_{\text{я}} = 0,2 \text{ Ом}$.

1. 1,5. 2. 2. 3. 4. 4. Визначити неможливо. 5. Інша відповідь.

7. Визначити швидкість обертання шестиполусного ротора трифазного синхронного двигуна, підключеного до мережі стандартної частоти.

1. 1000 об/хв. 2. 1450 об/хв. 3. 1500 об/хв. 4. 2000 об/хв.

5. Визначити не можна.

Тестове завдання № 10

1. Указати вираз для визначення коефіцієнта трансформації знижувального трансформатора k , якщо w_1 , w_2 – кількості витків його первинної та вторинної обмоток.

1. $k = w_1 + w_2$. 2. $k = w_1 - w_2$. 3. $k = w_1/w_2$. 4. $k = R_1/R_2$.

2. Визначити коефіцієнт трансформації однофазного двообмоткового знижувального трансформатора, якщо ЕРС, індуковані в первинній та вторинній обмотках, відповідно дорівнюють 500 і 127 В .

1. 20. 2. 25. 3. 50. 4. $\sim 2,5$. 5. $\sim 3,94$.

3. Як зміниться номінальний струм трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, якщо обмотки його статора перемкнуті з зірки на трикутник, а напругу живлення зменшити в $\sqrt{3}$ раз?

1. Зменшиться в $\sqrt{3}$ раз.

2. Зменшиться в 3 рази.

3. Збільшиться в $\sqrt{3}$ раз.

4. Збільшиться в 3 рази.

5. Залишиться без зміни.

4. Визначити величину струму, який споживає трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором при номінальному навантаженні та при з'єднанні обмоток трикутником, якщо відомі паспортні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,86$; $\cos \phi_{\text{ном}} = 0,88$.

1. 11,5 А. 2. 20 А. 3. 34,5 А. 4. 60 А. 5. Інша відповідь.

5. Указати рівняння рівноваги напруги двигуна постійного струму.

1. $U = c_e n \Phi - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$. 2. $U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$. 3. $U = U_{\text{я}} - c_e n \Phi$.

4. $U = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$. 5. $U = E_{\text{я}} + R_3 I_3 + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$.

6. Для шунтового генератора задано: $P_{\text{ном}} = 11$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220$ В; $R_{\text{я}} = 0,2$ Ом; $R_3 = 44$ Ом. Визначити ЕРС якоря.

1. 235 В. 2. 210 В. 3. 231 В. 4. 211 В. 5. Визначити неможливо.

7. Визначити частоту ЕРС, індукованої в обмотці статора чотирьополюсного синхронного генератора, при швидкості обертання ротора 3000 об/хв.

1. 50 Гц. 2. 100 Гц. 3. 150 Гц. 4. 250 Гц. 5. Інша відповідь.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н.* Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
2. Загальна електротехніка. Збірник програмованих задач / За ред. *П.П. Гадзейки.* – К.: Вища школа, 1976. – 200 с.
3. *Иванов А.А.* Справочник по электротехнике. – К.: Вища школа, 1984. – 304 с.
4. *Иванов И.И., Равдоник В.С.* Электротехника. – М.: Высшая школа, 1984. – 320 с.
5. *Липатов Д.Н.* Вопросы и задачи по электротехнике для программированного обучения: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Энергия, 1984. – 360 с.
6. *Нетушил А.В.* Справочное пособие по электротехнике и основам электроники. – М.: Высшая школа, 1986. – 248 с.
7. *Пантюшин В.С.* Электротехника. – М.: Высшая школа, 1984. – 560 с.
8. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов / Под ред. *В.Г. Герасимова.* – М.: Высшая школа, 1967. – 288 с.
9. Сборник задач с решениями по общей электротехнике / Под ред. проф. *В.К. Пономаренко.* – М.: Высшая школа, 1972. – 184 с.
10. Судовая электротехника и электроника / Под ред. *Д.В. Вилесова.* – Л.: Судостроение, 1985. – 312 с.
11. Электротехника: Учеб. для неэлектротехн. спец. вузов / Под ред. *В.Г. Герасимова.* – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Магнітні кола	6
1.1. Магнітні кола з постійною магніторушійною силою	6
1.1.1. Аналіз магнітних кіл з постійною магніторушійною силою.....	8
1.2. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою	14
1.2.1. Електромагнітні процеси в дроселі при змінних магнітних потоках	14
1.2.2. Індуктивна котушка з повітряним зазором у магнітопроводі	19
2. Трансформатори	22
2.1. Призначення і конструкція	22
2.2. Принцип роботи трансформатора	24
2.3. Холостий хід трансформатора	26
2.4. Навантажувальний режим трансформатора	28
2.5. Схема заміщення трансформатора і зміна вторинної напруги	33
2.6. Досліди холостого ходу і короткого замикання	35
2.7. Потужність і ККД трансформатора	38
2.8. Трифазні трансформатори	39
2.9. Спеціальні типи трансформаторів	41
3. Асинхронні електричні двигуни	50
3.1. Загальні відомості й основні поняття	50
3.2. Будава і принцип дії трифазних асинхронних електродвигунів	50
3.3. Процеси, що проходять у нерухомому роторі	54
3.4. Процеси, що проходять у рухомому роторі	55
3.5. Обертаючий момент трифазних асинхронних електродвигунів	56
3.6. Робочі характеристики двигуна	60
3.7. Пуск у хід асинхронних електродвигунів	61
3.7.1. Пуск короткозамкнених електродвигунів	62
3.7.2. Пуск фазних електродвигунів	64
3.8. Способи регулювання швидкості ротора	65

3.9. Однофазні асинхронні двигуни	69
3.10. Асинхронний тахогенератор	72
3.11. Сельсини	74
3.12. Крокові мікродвигуни	78
4. Електричні машини постійного струму	86
4.1. Будова	86
4.2. Принцип дії	87
4.3. Електрорушійна сила	88
4.4. Електромагнітний момент машини	89
4.5. Режими роботи машин постійного струму	90
4.6. Реакція якоря	92
4.7. Генератори постійного струму	94
4.7.1. Типи генераторів постійного струму	94
4.7.2. Характеристики генератора	95
4.7.3. Генератор з незалежним збудженням	95
4.7.4. Генератори із самозбудженням	97
4.7.5. Генератор паралельного збудження	99
4.7.6. Генератор послідовного збудження	101
4.7.7. Генератор змішаного збудження	101
4.8. Електродвигуни постійного струму	103
4.8.1. Пуск у хід і зупинка електродвигунів	104
4.8.2. Регулювання швидкості обертання електродвигунів	105
4.8.3. Реверс і гальмування електродвигунів	106
4.8.4. Характеристики електродвигунів постійного струму	108
4.8.5. Електродвигуни паралельного збудження	109
5. Синхронні машини	116
5.1. Призначення і будова синхронних машин	116
5.2. Принцип дії синхронних машин	118
5.2.1. Принцип дії генератора	118
5.2.2. Принцип дії двигуна	121
5.3. Явище реакції якоря	122
5.3.1. Реакція якоря генератора	122
5.3.2. Синхронний опір машини	124
5.4. Векторні діаграми	124
5.5. Характеристики генератора	125
5.6. Паралельна робота генератора	127

5.7. Розподіл навантаження при паралельній роботі	129
5.8. Робота трифазної синхронної машини в режимі двигуна ...	131
5.9. Гальмування синхронних двигунів	132
5.10. Утрати і ККД синхронних машин	133
6. Тестові завдання	135
Рекомендована література	147

КІНАШ Анатолій Тимофійович

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Навчальний посібник

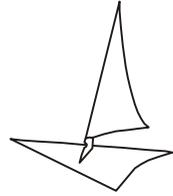
Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор М.Д. Белікчі
Комп'ютерна правка та верстка Т.М. Чередніченко
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 30.07.03. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 8,7. Обл.-вид. арк. 9,4. Тираж 300 прим. Вид. № 10.
Зам. № 204. Ціна договірна.



ВИДАВНИЦТВО УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО МОРСЬКОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника в повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі ІВМ РС, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублікатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати **підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки**, – ми до Ваших послуг.

© Український державний морський технічний університет

✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,

видавництво УДМТУ

☎ 8(0512) 37-33-42; 39-81-46, 39-73-39, fax 8(0512) 39-73-26;

E-mail: publishing@usmtu.edu.ua