

10. ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

Серед двигунів найбільшого поширення набули асинхронні двигуни внаслідок їх дешевизни й надійності.

До асинхронних відносять машини змінного струму, частота обертання ротора n_2 яких за постійної частоти змінного струму джерела f змінюється зі змінюванням навантаження і відрізняється від синхронної частоти, тобто від частоти обертання магнітного поля статора n_1 . “Асинхронний” – *неодночасний*.

Як і всі електричні машини, асинхронна є зворотною, тобто може працювати й у генераторному режимі, й у режимі двигуна. Але асинхронні генератори практично не застосовують.

10.1. Будова асинхронного двигуна

Асинхронний двигун складається з нерухомого статора і обертового ротора, розділених повітряним проміжком (рис. 10.1).

Статор складається з корпусу 1, виконаного з алюмінієвого сплаву, з ребрами для охолодження, осердя статора 2, набраного з листів електротехнічної сталі і запресованого у корпус. На внутрішній поверхні осердя виштампувані пази, в які укладають обмотку статора 3. Ротор складається з шихтованого осердя 4, в пазах якого укладена обмотка ротора 5. Між ротором і статором виконаний невеликий повітряний проміжок 6. Осердя ротора 4 закріплено на валу 7. Статор підтримується на підшипникових щитах 8, а корпус 1 кріпиться до основи за допомогою лап 9. З одного боку ротора на валу закріплений вентилятор 10, закритий тонким кожухом вентилятора 11. Виводи обмотки статора 3 приєднані до клемної коробки 12. Це обмотка трифазна. Осі окремих обмоток (фаз) розташовані відносно один одного під кутом 120° . Між собою обмотки з'єднуються у “зірку” або “трикутник”.

Призначення статора – утворювати обертове магнітне поле за допомогою трифазної обмотки, яка живиться трифазною системою струмів.

Призначення ротора – перетворювати електричну енергію в механічну обертового руху за допомогою індукованої ЕРС та струмів у обмотці. Типи

асинхронних двигунів в основному відрізняються будовою ротора, який може бути виконаний короткозамкненим або фазним.

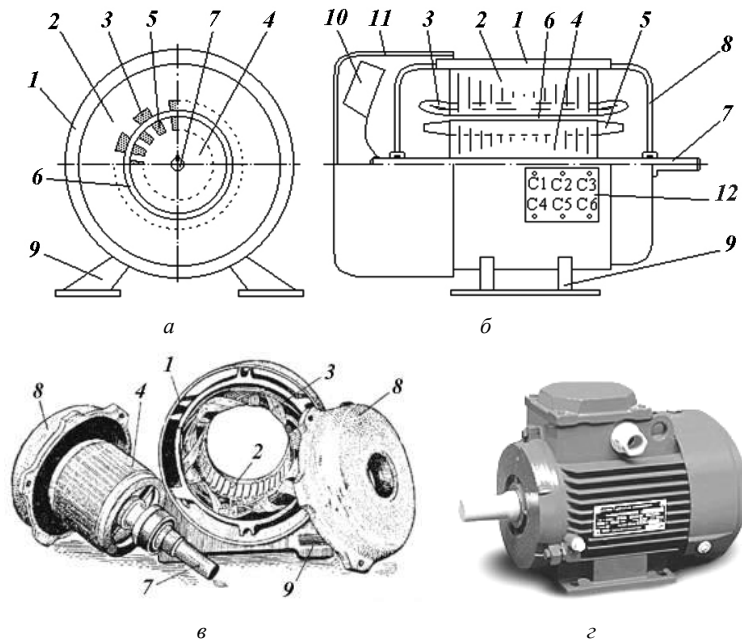


Рис.10.1. Трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором:

а – поперечний, б – повздовжній перерізи; в – розібраний; г – загальний вигляд;

1 – корпус; 2 – осердя статора; 3 – обмотка статора; 4 – осердя ротора; 5 – обмотка ротора;

6 – повітряний проміжок; 7 – вал; 8 – підшипникові щити; 9 – лапи; 10 – вентилятор;

11 – кожух вентилятора; 12 – клемна коробка

У *короткозамкненому роторі* виконують обмотку за типом білячої клітки (рис. 10.2). У пази осердя ротора без ізоляції укладають (заливають) алюмінієві або латунні стрижні, які з кінців з'єднані торцевими кільцями з того ж матеріалу. Короткозамкнений ротор не має електричного зв'язку з зовнішньою мережею.

У *фазному роторі* або в роторі з контактними кільцями в пази ротора укладають трифазну мідну обмотку, яка, як правило, з'єднана “зіркою” (рис. 10.3). Кінці кожної фази обмотки $P1$, $P2$ і $P3$ приєднані до трьох мідних контактних кілець, насаджених на вал ротора та ізольованих як між собою, так і від сталевого

осердя ротора. На кільця накладаються щітки, які розміщені у щіткотримачах на одному з підшипникових щитів. Щітки, які ковзають по поверхні кілець ротора, весь час мають з ними достатній електричний контакт і з'єднані з обмоткою ротора. Таким чином, за допомогою щіток обмотка ротора може бути з'єднана з зовнішнім колом, а саме, трифазним пусковим реостатом R_p (рис. 10.3).

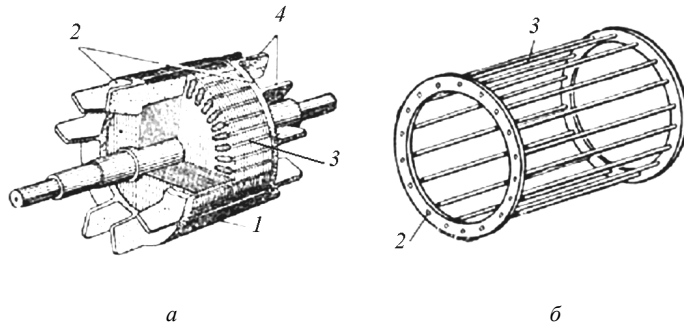


Рис. 10.2. Короткозамкнений ротор:

а – конструктивний; б – схематичний вигляд: 1 – осердя ротора; 2 – торцеві кільця; 3 – стрижні; 4 – вентиляційні лопатки

Будова статора асинхронного двигуна з фазним ротором (рис. 10.3) практично не відрізняється від будови статора двигуна з короткозамкненим ротором (рис. 10.2).

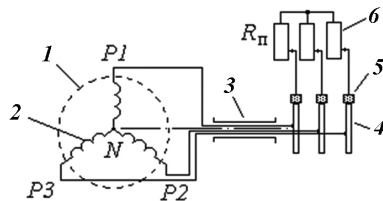


Рис. 10.3. Схема фазного ротора асинхронного двигуна:

1 – ротор; 2 – трифазна обмотка; 3 – вал; 4 – контактні кільця; 5 – щітки; 6 – трифазний пусковий реостат

Асинхронні двигуни з фазним ротором застосовуються у важких умовах роботи, де необхідно великий пусковий момент. Вони конструкційно складніші та дорожчі під час виготовлення, ніж короткозамкнені, вимагають постійного догляду під час експлуатації.

10.2. Принцип дії асинхронного двигуна

Робота асинхронної машини заснована на перетворенні електромагнітної енергії, яка передається магнітним полем у повітряному проміжку між статором та ротором. В основі роботи трифазного асинхронного двигуна лежить використання кругового обертового магнітного поля. Це поле утворюється трифазною обмоткою, яка розташована в пазах неявнополюсного осердя статора.

Для утворення обертового магнітного поля необхідні дві умови. По-перше, треба щоб просторовий зсув між обмотками (фазами), які утворюють магнітне поле, складав 120° . По-друге, треба щоб фазовий (часовий) зсув струмів у цих обмотках складав 120 електричних градусів.

На рис. 10.4 зображено повздовжній переріз та загальний вигляд (серія МТ) асинхронного двигуна з фазним ротором.

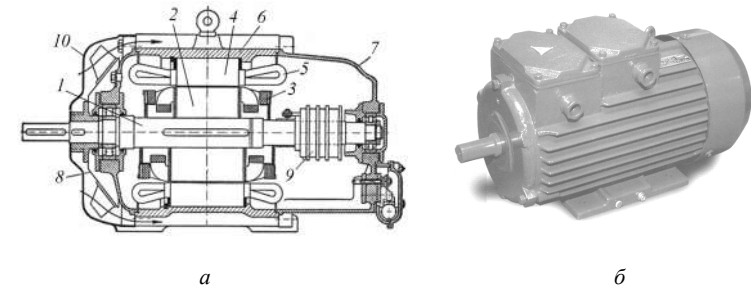


Рис.10.4. Асинхронний двигун з фазним ротором:

а – повздовжній переріз; б – загальний вигляд (серія МТ);

1 – вал; 2 – осердя ротора; 3 – обмотка ротора; 4 – осердя статора; 5 – обмотка статора; 6 – корпус; 7 – підшипникові кришки; 8 – вентилятор; 9 – контактні кільця; 10 – вентиляційна кришка

У трифазному асинхронному двигуні осі статорних обмоток $A-X$, $B-Y$ і $C-Z$ зміщені відносно одна одної на 120° уздовж внутрішньої поверхні статора (рис. 10.5), що забезпечує просторовий зсув. Фазовий зсув між струмами, а відтак і магнітними полями обмоток, виникає під час увімкнення цих обмоток до трифазної мережі.

У разі ввімкнення до трифазної мережі струми статорних обмоток зсунуті на електричний кут 120° :

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (10.1)$$

Аналогічно можна записати і для магнітних полів, які утворюються цими струмами:

$$\begin{aligned} B_A &= B_m \sin \omega t; \\ B_B &= B_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ B_C &= B_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (10.2)$$

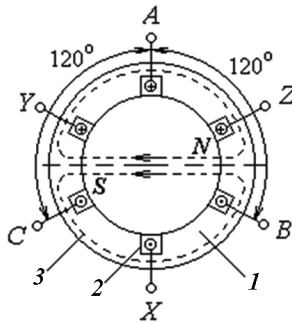


Рис.10.5. Схема статора трифазного асинхронного двигуна:
1 – осердя; 2 – пази з обмоткою; 3 – лінії магнітного поля

Синусоїдний розподіл магнітної індукції поля в повітряному проміжку машини практично досягається розподіленням багатовиткової котушки обмотки статора на декілька секцій і рівномірним укладенням їх у декілька рядом розташованих пазів.

Щоб упевнитись, що поле трифазної обмотки є обертовим, розглянемо спрощені картини магнітних полів у статорі двополюсного двигуна для трьох моментів часу I – III за максимумів струмів у фазах (рис. 10.6, з). У момент часу I (рис. 10.6, а) струм в обмотці A-X $i_A = I_m$, а струми в обмотках B-Y та C-Z

$i_B = i_C = -0,5I_m$ (рис. 10.6, з). Суперпозиція полів, утворених обмотками, дає поле машини, силові лінії якого направлені горизонтально. Магнітні полюси поля N і S утворюють вісь поля в середині статора.

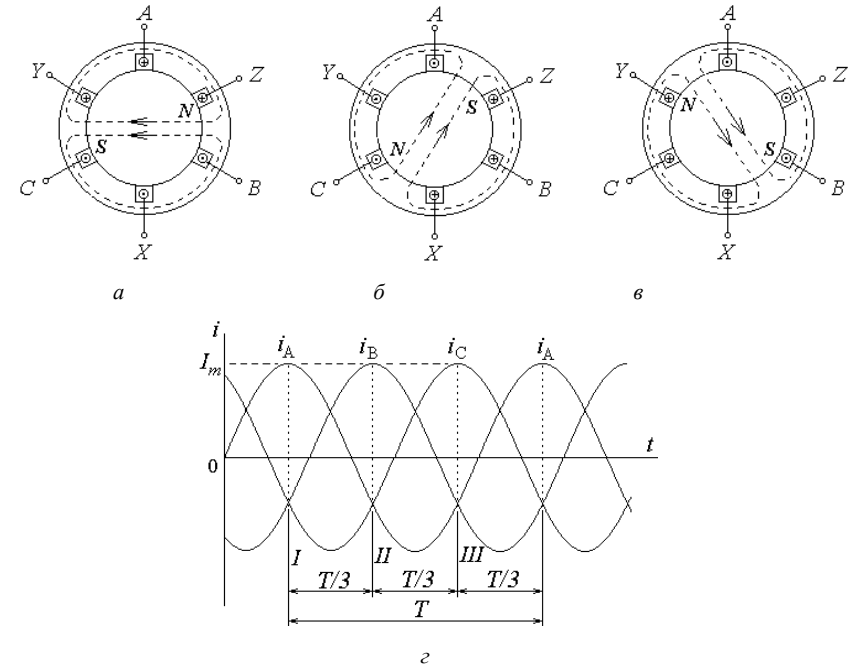


Рис. 10.6. Отримання двополюсного обертового магнітного поля за допомогою трифазного струму:
а – момент часу I; б – момент часу II; в – момент часу III;
з – графік струмів статора в функції часу

В момент часу II (рис. 10.6, б) струм в обмотці B-Y $i_B = I_m$, а струми в обмотках A-X та C-Z $i_A = i_C = -0,5I_m$ (рис. 10.6, з). Картина поля така ж, як і для моменту часу I, тільки вісь поля повернулась по ходу годинникової стрілки на 120° , співпадаючи з віссю поля обмотки B-Y. У момент часу III (рис. 10.6, в) струм в обмотці C-Z $i_C = I_m$, а струми в обмотках A-X і B-Y та $i_A = i_B = -0,5I_m$ (рис. 10.6, з). Картина поля така ж, як і для моменту часу I, тільки вісь поля повернулась за ходом годинникової стрілки на 240° , співпадаючи з віссю поля обмотки C-Z.

Результуючий вектор магнітного поля дорівнює $1,5 \cdot B_m$ (B_m – амплітуда поля одної фази) й обертається з кутовою швидкістю ω у бік фази, що відстає. Таке поле, що обертається, називають круговим магнітним полем. Рух магнітної хвилі супроводжується переміщенням магнітних полюсів N і S у внутрішній поверхні статора, причому залежність магнітного поля у повітряному проміжку близька до синусоїдної.

Таким чином, під час прямого чергування фаз обмотки статора ($A-B-C$) поле двополюсної машини рівномірно обертається за ходом годинникової стрілки, здійснюючи повний оберт у просторі за один період синусоїдного струму. Якщо змінити порядок чергування фаз в обмотці статора на зворотній, наприклад $B-A-C$, для чого необхідно зміни приєднання до мережі будь-яких двох фазних обмоток, то магнітне поле машини буде обертатись у зворотному напрямку, тобто проти ходу годинникової стрілки.

Частота обертання магнітного поля двополюсних асинхронних двигунів під час живлення трифазною системою з частотою 50 Гц складає:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/хв}, \quad (10.3)$$

де f – частота струму в обмотках; p – кількість пар полюсів магнітного поля.

Щоб отримати меншу частоту обертання, трифазні асинхронні двигуни виконуються з 2, 4, 6 і більшою кількістю полюсів статора (відповідно з кількістю пар полюсів $p = 1, 2, 3$ та більше). Для цього кожна фазна обмотка статора складається з двох, трьох, чотирьох і більше котушок, які з'єднуються між собою послідовно або паралельно.

Принцип дії трифазного асинхронного двигуна. До трифазної обмотки статора підводиться змінна трифазна напруга частотою f , під дією якої по фазах проходить трифазний струм. Оскільки струми у фазах зсунуті у просторі й у часі на 120° відносно один одного, то виникає магнітне поле, що обертається з синхронною швидкістю $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$. У провідниках обмоток статора і ротора під дією цього поля

за законом електромагнітної індукції будуть наводитись ЕРС, відповідно E_1 і E_2 . Оскільки коло ротора замкнене накоротко або на резистори, то під дією ЕРС E_2 по обмотці ротора проходить струм I_2 . На кожний провідник ротора за законом Ампера буде діяти сила, у результаті чого ротор почне обертатись.

Таким чином, принцип дії асинхронного двигуна заснований на взаємодії обертового магнітного поля, утвореного обмоткою статора, зі струмами, які індукуються цим же полем у провідниках обмотки ротора.

Отже, коли ротор нерухомий, то кожний його провідник перетинають силові лінії поля максимальну кількість разів.

10.3. Параметри асинхронного двигуна

Всі параметри статора мають індекс – 1, а ротора – 2. В асинхронному двигуні магнітне поле статора та ротор обертаються в один бік, але ротор “проковзує” відносно магнітного поля. Швидкість обертання ротора n_2 за визначенням асинхронного двигуна не дорівнює швидкості обертання магнітного поля статора n_1 , тобто між ними існує відносна швидкість $n_1 - n_2$.

Для оцінювання відносної швидкості вводять поняття ковзання:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (10.4)$$

Ковзання – це безрозмірна величина, що вимірюється у відносних одиницях, або в %.

В асинхронних двигунах за номінального навантаження $S_{\text{ном}} = 2 \dots 7 \%$.

Значення та знак ковзання визначають режим роботи асинхронної машини. Так, в режимі ідеального неробочого ходу ротор і магнітне поле обертаються з однаковими частотами в одному напрямку, ковзання $s = 0$, ротор нерухомий відносно обертового магнітного поля, ЕРС у його обмотці не наводиться, струм ротора та електромагнітний момент машини відсутні. Під час пуску ротор у перший момент часу нерухомий, а значить $s = 1$. У загальному випадку ковзання у двигуновому режимі змінюється від $s = 1$ за пуску до $s = 0$ у режимі ідеального

неробочого ходу. У разі обертання ротора зі швидкістю $n_2 > n_1$ у напрямку обертання магнітного поля ковзання s стає від'ємним, і машина переходить у генераторний режим і розвиває гальмівний момент. У разі обертання ротора в напрямку, протилежному напрямку обертання магнітного поля ($s > 1$), асинхронна машина переходить у режим противмикання і також розвиває гальмівний момент.

Таким чином, залежно від ковзання виділяють двигуновий ($s = 1 \div 0$), генераторний ($s = 0 \div -\infty$) режими та противмикання ($s = 1 \div +\infty$). Режими генераторний та противмикання використовують для гальмування асинхронних двигунів.

У нормальних умовах роботи між статором і ротором асинхронного двигуна існує тільки електромагнітний зв'язок, як у трансформаторі, тому електромагнітні процеси в них аналогічні. В асинхронному двигуні первинною є обмотка статора, вторинною – обмотка ротора. При цьому основні електричні величини – ЕРС і струми в обмотках статора та ротора змінюються відповідно до співвідношення їх кількості витків w_1 та w_2 .

Розглянемо ЕРС в обмотках асинхронного двигуна. Обертальне магнітне поле статора, як і в трансформаторі, наводить в обмотці статора ЕРС:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \Phi_m w_1 k_{обм1}, \quad (10.5)$$

де f_1 – частота підведеної напруги;

Φ_m – максимальне значення магнітного поля;

w_1 – кількість витків в обмотці статора;

$k_{обм1}$ – обмотувальний коефіцієнт статора (складає 0,98...0,92).

Обмотувальний коефіцієнт виникає внаслідок того, що для забезпечення синусоїдного розподілу магнітної індукції в проміжку зазвичай провідники знаходяться не в одному, а в декількох пазах і потоком перетинаються не одночасно, тобто має місце скіс пазів – нахил їх осі до осі машини, і має місце скорочення обмоток.

В обмотці ротора ЕРС, як і у вторинній обмотці трансформатора, визначається за аналогічною формулою:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \Phi_m w_2 k_{обм2}, \quad (10.6)$$

де f_2 – частота ЕРС ротора;

w_2 – кількість витків в обмотці ротора;

$k_{обм2}$ – обмотувальний коефіцієнт ротора.

Але частота ЕРС і струму в роторі визначається з такого виразу:

$$n_1 - n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p}. \quad (10.7)$$

Звідси отримуємо частоту ЕРС та струму в обмотці ротора:

$$f_2 = \frac{(n_1 - n_2) \cdot p}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{p \cdot n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 \cdot s,$$

або в остаточному вигляді:

$$f_2 = f_1 \cdot s. \quad (10.8)$$

З отриманого виразу (10.8) маємо, що у нерухомому роторі ($s = 1$) частота ЕРС і струму будуть дорівнювати частоті підведеної напруги.

Якщо підставити (10.8) у формулу (10.6), то отримуємо:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \Phi_m w_2 k_{обм2} = 4,44 \cdot f_1 s \cdot \Phi_m w_2 k_{обм2} = E_{20} s,$$

або в остаточному вигляді:

$$E_2 = E_{20} s, \quad (10.9)$$

де $E_{20} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m w_2 k_{обм2}$ – ЕРС нерухомого ротора.

Коли ротор нерухомий (в момент пуску), то $s = 1$ і в обмотці ротора наводиться максимальна ЕРС, а в режимі ідеального НХ, коли $n_2 = n_1$, ця ЕРС дорівнює нулю.

Розглянемо опори обмоток асинхронного двигуна. Активний опір ротора R_2 не змінюється, а індуктивний під час роботи змінюється:

$$X_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = X_{20} s,$$

або в остаточному вигляді:

$$X_2 = X_{20} s, \quad (10.10)$$

де $X_{20} = 2\pi f_1 L_2$ – індуктивний опір нерухомого ротора ($s=1$).

Отже, як ЕРС E_2 , так і індуктивний опір X_2 ротора змінюються залежно від швидкості його обертання.

10.4. Рівняння електричного стану кіл статора і ротора

Для трансформатора за другим законом Кірхгофа було отримано рівняння електричного стану для первинної обмотки (6.17). Аналогічне рівняння можна записати для статорної обмотки асинхронного двигуна:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (R_1 + jX_1), \quad (10.11)$$

де R_1 та X_1 – активний та індуктивний опори розсіювання фазної обмотки статора.

Для вторинної обмотки трансформатора було отримано рівняння електричного стану (6.19). Аналогічне рівняння можна записати для роторної обмотки асинхронного двигуна:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2, \quad (10.12)$$

де R_2 та X_2 – активний та індуктивний опори розсіювання обмотки ротора.

Але оскільки обмотка ротора замкнена накоротко, то $\underline{U}_2 = 0$, і тоді для роторної обмотки можна записати таке рівняння:

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_2. \quad (10.13)$$

Останній вираз перетворимо, підставивши в (10.13) рівняння (10.9) та (10.10):

$$\underline{E}_{20} s = \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_{20} s. \quad (10.14)$$

Після поділу на величину ковзання отримуємо:

$$\underline{E}_{20} = \underline{I}_2 \frac{R_2}{s} + j \underline{I}_2 X_{20} = \underline{I}_2 \left(\frac{R_2}{s} + jX_{20} \right) = \underline{I}_2 \underline{Z}_2, \quad (10.15)$$

де Z_2 повний опір обмотки ротора:

$$\underline{Z}_2 = \frac{R_2}{s} + jX_{20}. \quad (10.16)$$

З рівняння (10.15) визначаємо струм в обмотці ротора асинхронного двигуна у комплексному вигляді:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_{20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{20}}. \quad (10.17)$$

Запишемо модуль цього струму:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}. \quad (10.18)$$

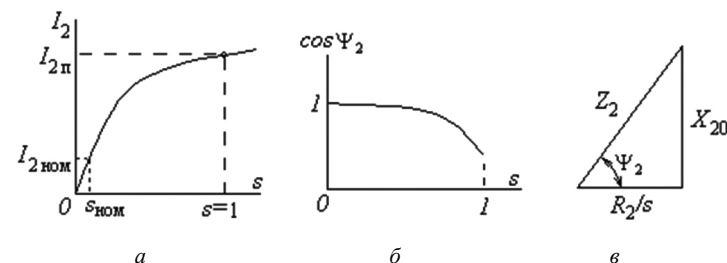


Рис. 10.7. Параметри ротора асинхронного двигуна:

a – графік залежності струму ротора від ковзання;

б – графік залежності $\cos \Psi_2$ від ковзання;

в – трикутник опорів ротора асинхронного двигуна

На рис. 10.7, *a* побудована залежність струму ротора від ковзання, звідки виходить, що пусковий струм ротора асинхронного двигуна (за $s = 1$) дуже великий – у 5–8 разів перевищує номінальний. А оскільки струм ротора практично прямо пропорційний струму статора, як це має місце між вторинним і первинним струмами у трансформаторі (6.24), то відповідно пусковий струм статорної обмотки буде у 4–8 разів перевищувати номінальне значення.

Величина $\cos \Psi_2$ (кут Ψ_2 між ЕРС і струмом ротора), враховуючи формулу (10.16), також залежить від ковзання (рис. 10.7, *б*):

$$\cos \Psi_2 = \frac{R'}{Z'} = \frac{\frac{R_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}. \quad (10.19)$$

Величина $\cos \Psi_2$ має мінімальне значення під час пуску двигуна. На рис. 10.7, *в* побудовано трикутник опорів ротора асинхронного двигуна. Отже, одна з проблем асинхронного двигуна – це великий пусковий струм.

10.5. Енергетична діаграма втрат і ККД асинхронного двигуна

Перетворення електричної енергії джерела в механічну енергію обертання ротора асинхронного двигуна супроводжується втратами (рис. 10.8).

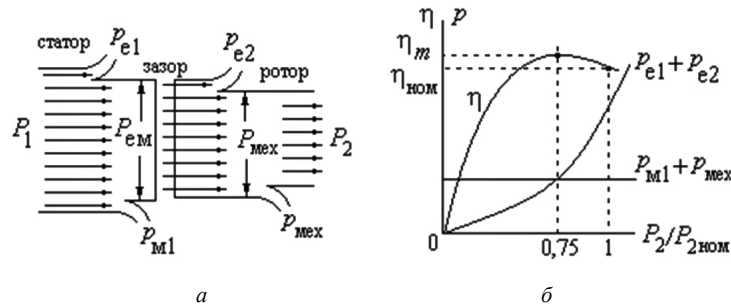


Рис. 10.8. Перетворення енергії в ТАД:

а – енергетична діаграма; б – ККД асинхронного двигуна

До асинхронного двигуна з мережі підводиться електрична потужність (рис. 10.8, а):

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (10.20)$$

У процесі роботи мають місце:

1. Магнітні втрати у сталі статора p_{m1} , які виникають через вихрові струми і гістерезис.
2. Електричні втрати в мідних обмотках статора $p_{e1} = 3I_1^2 R_1$.
3. Електромагнітна потужність, яка передається від статора до ротора через повітряний проміжок:

$$P_{em} = P_1 - (p_{m1} + p_{e1}) = E_{20} I_2 \cos \Psi_2. \quad (10.21)$$

У роторі мають місце такі втрати:

1. Електричні втрати в обмотках ротора $p_{e2} = 3I_2^2 R_2$;
2. Механічні втрати, обумовлені всіма видами тертя $p_{мех}$.

P_2 – корисна механічна потужність на валу менше за підведену на величину втрат:

$$P_2 = P_1 - (p_{m1} + p_{e1} + p_{e2} + p_{мех}). \quad (10.22)$$

ККД асинхронного двигуна визначається відношенням корисної механічної потужності на валу P_2 до потужності, яка споживається з мережі P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (10.23)$$

де $p_{m1} + p_{мех}$ – постійні втрати, що не залежать від навантаження. Ці втрати визначають з дослідів НХ (рис. 10.8, б);

$p_{e1} + p_{e2}$ – змінні (електричні) втрати, що залежать від навантаження. Ці втрати визначають з дослідів КЗ у разі загальмованого ротора та номінальних струмів статора і ротора.

Асинхронний двигун проектується так, щоб ККД був максимальним у разі навантаження 75 %, оскільки частіше вони працюють з недовантаженням. Номінальний ККД двигуна збільшується зі збільшенням потужності $P_{ном}$ і зазвичай знаходиться в межах 70–95 %.

10.6. Електромагнітний момент і механічна характеристика асинхронного двигуна

Обертальний момент асинхронного двигуна утворюється в результаті взаємодії обертального магнітного поля обмотки статора та індукovanого струму в обмотці ротора.

Електромагнітний момент визначаємо за формулою:

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_1}, \quad (10.24)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \frac{n_1 p}{60}$ – кутова швидкість обертання магнітного потоку.

Електромагнітна потужність дорівнює:

$$P_{em} = E_{20} I_2 \cos \Psi_2. \quad (10.25)$$

Підставляємо (10.25) значення у формулу (10.24) й отримуємо:

$$M_{em} = \frac{4,44 w_{21} \Phi_m k_{обм2}}{2\pi n_1 p} I_2 \cos \Psi_2 = C'_M \Phi_m I_2 \cos \Psi_2.$$

Коефіцієнт $C'_M = \frac{4,44w_2f_1\Phi_mk_{обм2}}{2\pi n_1p}$ є постійною величиною двигуна.

Остаточно отримуємо:

$$M_{ем} = C'_M \Phi_m I_2 \cos \Psi_2. \quad (10.26)$$

Таким чином, обертальний момент асинхронного двигуна пропорційний магнітному потоку статора й активній складовій струму ротора. Зробимо подальші перетворення. Замінімо величини, що входять у формулу (10.26), враховуючи що:

$$\cos \Psi_2 = \frac{R_2/s}{\sqrt{\left(R_2/s\right)^2 + X_{20}^2}},$$

максимальний магнітний потік:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44w_1f_1k_{обм1}} \approx \frac{U_1}{4,44w_1f_1k_{обм1}} \quad (10.27)$$

та струм обмотки ротора:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(R_2/s\right)^2 + X_{20}^2}}.$$

Відношення ЕРС нерухомого ротора $E_{20} = 4,44w_2f_1\Phi_mk_{обм2}$ до ЕРС обмотки статора $E_1 = 4,44w_1f_1\Phi_mk_{обм1}$ подаємо у такому вигляді:

$$E_{20} = \frac{w_2k_{обм2}}{w_1k_{обм1}} E_1. \quad (10.28)$$

Оскільки $E_1 \approx U_1$, отримаємо вираз струму обмотки ротора:

$$I_2 \approx \frac{w_2k_{обм2}}{w_1k_{обм1}} \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_2/s\right)^2 + X_{20}^2}}. \quad (10.29)$$

Підставляємо значення формул (10.27), (10.19) та (10.29) у (10.26), отримаємо вираз для моменту асинхронного двигуна:

$$M_{ем} = C'_M U_1^2 \frac{R_2/s}{\left(R_2/s\right)^2 + X_{20}^2}. \quad (10.30)$$

Отже, момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату підведеної напруги. Таким чином, цей двигун дуже чутливий до коливань напруги джерела.

Підставивши ряд значень s , отримаємо залежність моменту від ковзання $M(s)$ (рис. 10.9, а). Враховуючи, що $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, отримаємо частоту обертання ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (10.31)$$

Механічну характеристику вводять як залежність частоти обертання ротора від обертового моменту двигуна $n_2(M)$, яку можна побудувати по точках, перебудувавши залежність $M(s)$ у нових координатах (рис. 10.9, б).

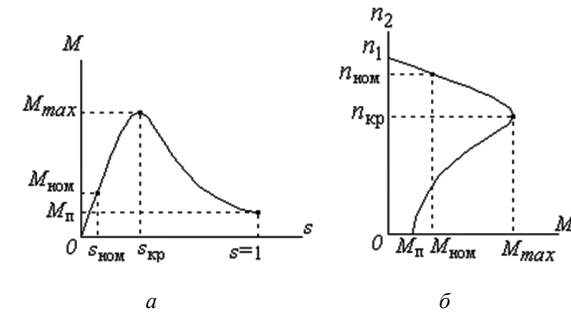


Рис. 10.9. Механічні характеристики асинхронного двигуна:
а – $M(s)$; б – $n_2(M)$

У момент пуску за $s = 1$ механічний момент, що розвиває асинхронний двигун $M_п$, малий, хоча струм ротора при цьому максимальний (див. рис. 10.7, а). Невеликий пусковий момент $M_п$ обумовлений великим індуктивним опором ротора та малим значенням $\cos \Psi_2$.

Якщо пусковий момент більший за гальмівний $M_{\text{п}} > M_{\text{гальм}}$, то ротор починає обертатись. У міру розгону ротора зменшується ковзання, а отже, знижується індуктивний опір та підвищується $\cos \Psi_2$ (див. рис. 10.7, в). За певного критичного ковзання $s = s_{\text{кр}}$ двигун розвиває найбільший момент M_{max} . У разі подальшого зменшення ковзання s значення $\cos \Psi_2$ змінюється мало і момент зменшується за рахунок зниження струму ротора (див. рис. 10.7, б).

Величина максимального моменту M_{max} не залежить від значення активного опору ротора, тому, якщо у коло ротора ввести додатковий активний опір $R_{\text{д}}$, то максимальний момент не зміниться, але максимум настане за більшого значення ковзання (рис. 10.10).

Змінювати опір кола ротора можливо в АД з фазним ротором. Таким чином, двигун з фазним ротором має природну (за $R_{\text{д}} = 0$) та штучні (за $R_{\text{д}} > 0$) механічні характеристики. З сімейства характеристик двигуна (рис. 10.10) виходить, що за заданого навантаження $M_{\text{гальм}}$ асинхронний двигун може працювати на різних характеристиках із різною дискретною частотою обертання, яка змінюється.

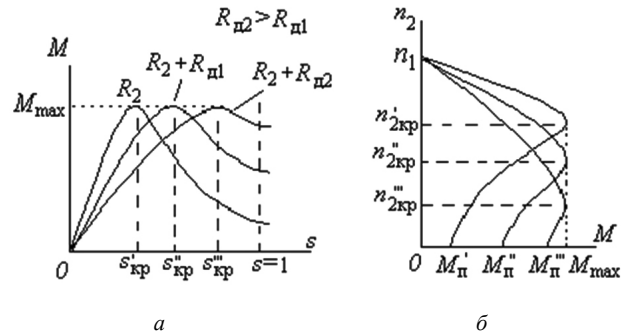


Рис. 10.10. Механічні характеристики асинхронного двигуна за додаткових опорів $R_{\text{д}}$ у колі обмотки ротора:

$a - M(s)$; $б - n_2(M)$

Пусковий реостат у колі ротора в цьому випадку називається пускорегулювальним. Його ступені розраховуються на тривале ввімкнення, а не тільки на час пуску, як пускові реостати. Крім того, змінюючи опір кола ротора, ми

можемо підібрати таке значення додаткового опору $R_{\text{д2}}$, щоб під час пуску двигун розвивав найбільший момент.

10.7. Способи пуску асинхронних двигунів

Асинхронний двигун під час пуску має дві проблеми:

- малий пусковий момент $M_{\text{п}}$;
- великий пусковий струм $I_{\text{п}}$.

Якщо пусковий момент $M_{\text{п}}$ малий, то двигун довго розганяється, що знижує його продуктивність. Великий пусковий струм $I_{\text{п}}$ негативно впливає на зовнішню мережу – можливе просідання напруги.

Прямий пуск. Під час пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором застосовують пряме вмикання (рис.10.11, а). Напруга мережі дорівнює номінальній напрузі двигуна, що безпосередньо підводиться до статорної обмотки. Такий спосіб пуску застосовують для двигунів із відносно малою потужністю.

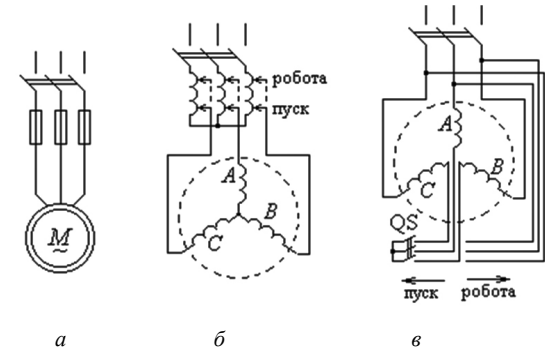


Рис. 10.11. Схеми пуску асинхронних двигунів:

a – прямий пуск; $б$ – автотрансформаторний пуск;

$в$ – перемикання трикутника на зірку

Якщо потужність асинхронного двигуна $P > 100$ кВт, то його пуск виконують за *пониженої напруги*, використовуючи, наприклад, автотрансформаторний спосіб і спосіб перемикання обмотки статора з зірки на трикутник.

За *автотрансформаторного* способу пуску до обмотки статора двигуна вмикають автотрансформатор (АТ) (рис. 10.11, б). У момент пуску напруга, що подається до асинхронного двигуна АД, відрізняється від напруги мережі U_1 на коефіцієнт трансформації k_A :

$$U_{\text{АД}} = \frac{U_1}{k_A}. \quad (10.32)$$

Відповідно пусковий струм двигуна:

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{\text{АД}}}{k_A} = \frac{1}{k_A} \frac{U_{\text{АД}}}{Z_{\text{АД}}} = \frac{1}{k_A} \frac{1}{Z_{\text{АД}}} \frac{U_1}{k_A} = \frac{1}{k_A^2} \frac{U_1}{Z_{\text{АД}}}. \quad (10.33)$$

Отже, пусковий струм зменшується у k_A^2 разів.

Зазначимо, що оскільки $M \sim U_1^2$, то пусковий момент також зменшується у k_A^2 разів. Тому такий спосіб пуску можливий тільки у разі пуску АД без навантаження, тобто на холостому ході.

Спосіб пуску шляхом *перемикання обмотки статора з зірки на трикутник* реалізується таким чином. Якщо в процесі роботи двигуна обмотка статора була з'єднана трикутником, то під час пуску її з'єднують зіркою (рис. 10.11, в). При цьому напруга двигуна зменшується у $\sqrt{3}$ разів, а пусковий струм і пусковий момент знижуються у 3 рази.

У положенні перемикача “пуск” обмотка статора з'єднана зіркою під час пуску. Коли швидкість двигуна приблизно дорівнює номінальній, то рубильник перемикають у положення “робота”.

Для покращення пускових характеристик асинхронний двигун виконують з фазним ротором (рис. 10.3, 10.4). Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором здійснюють уручну або автоматично.

Ручний пуск здійснюють за допомогою пускового реостата. Із заданим моментом $M_{\text{пер}}$ перехід з одної характеристики на іншу відбувається у момент вимкнення відповідного ступеня реостата (його опір зменшується) (рис. 10.10). У разі пуску двигуна опір пускового реостата $R_{\text{д2}}$ обирають так, щоб пусковий струм не перевищував допустимого значення і пусковий момент двигуна дорівнював

максимальному значенню (рис. 10.12). Потім виводиться перший ступінь пускового реостата та його опір зменшується до значення $R_{\text{д1}}$. При цьому асинхронний двигун переходить на наступну штучну характеристику і т. ін. до повного виводу пускового реостата $R_{\text{д}} = 0$.

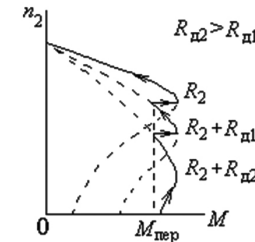


Рис. 10.12. Пуск двигуна з фазним ротором

Уведення реостата у коло ротора дозволяє як зменшити пусковий струм двигуна, так і збільшити пусковий момент двигуна.

10.8. Асинхронні двигуни з покращеними пусковими характеристиками

До основних різновидів асинхронних двигунів із короткозамкненою обмоткою з покращеними пусковими характеристиками відносяться: двигун із глибоким пазом у роторі – глибокопазний асинхронний двигун, та двигун із подвійною “білячою кліткою” ротора.

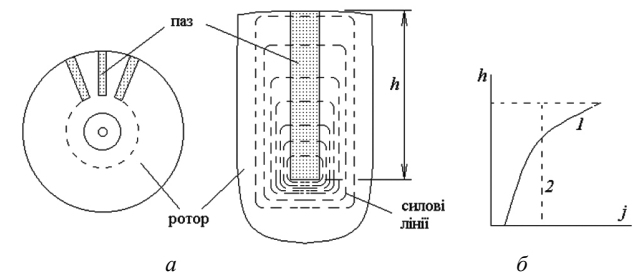


Рис. 10.13. До розгляду глибокопазного асинхронного двигуна: а – розподіл силових ліній в пазу; б – залежність струму від висоти перерізу

У глибокопазного асинхронного двигуна відношення ширини паза до його висоти складає приблизно 1/10 (рис. 10.13).

Покращення пускових властивостей цього двигуна базується на явищі витіснення струму з нижніх шарів стрижнів клітки у верхні (“скін-ефект”). Будь-який стрижень клітки ротора можна уявно розділити на ряд шарів зі своїм струмом і полем розсіювання. Нижні шари провідників зчеплені з більшою частиною поля розсіювання, у порівнянні з верхніми шарами, тобто вони мають більшу індуктивність $L = \Psi / i$ (рис. 10.13, а).

У результаті індуктивний опір стрижня у перерізі зростає у напрямку до осі ротора. Внаслідок цього струм витісняється з нижніх шарів у верхні. Відповідно, густина струму j зростає у зворотному напрямку по висоті перерізу (рис. 10.13, б). Цей ефект буде максимальним під час пуску АД (крива 1), коли частота струму в роторі максимальна. Оскільки площа поперечного перерізу паза зменшується, то опір стрижня зростає $R \uparrow = \rho \frac{l}{s \downarrow}$. Зменшення під час пуску ефективного перерізу стрижнів еквівалентно збільшенню його активного опору. Виходить, що під час пуску у коло ротора начебто ввели додатковий опір.

У подальшому в міру розгону ТАД частота перемагнічування падає, роль індуктивного опору знижується, скін-ефект зникає, щільність струму рівномірно розподіляється по стрижню (лінія 2) й активний переріз стрижня знижується.

Асинхронний двигун із подвійною “білячою кліткою” має дві обмотки: пускову та робочу. Пускова обмотка (ПО) – невеликого розміру з великим питомим опором (латунь, бронза) (рис. 10.14, а). Вона має великий опір. Робоча обмотка (РО) з великим перерізом і матеріалом із малим питомим опором має малий опір. Клітки ротора асинхронного двигуна по торцях з’єднані, тобто дві обмотки між собою з’єднані паралельно.

Під час пуску асинхронного двигуна струм унаслідок скін-ефекту витісняється у верхню пускову обмотку. При цьому утворюється великий пусковий опір обмотки ротора. По мірі розгону двигуна, коли частота струму в роторі знижується, струм переходить у робочу обмотку з малим опором. Відбувається перерозподілення струму в обмотці ротора.

Кожна клітка ротора утворює свій момент M_{po} та $M_{по}$. Оскільки обидві обмотки знаходяться в одному роторі, то їх обертальні моменти додаються. Пусковий момент зовнішньої обмотки майже дорівнює пусковому моменту двигуна, а в робочому режимі майже весь обертальний момент утворюється внутрішньою робочою обмоткою (рис. 10.14, б).

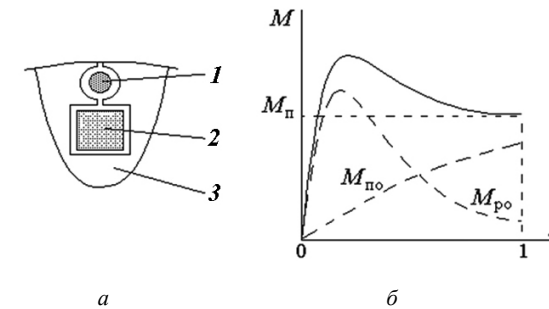


Рис. 10.14. Асинхронний двигун з подвійною “білячою кліткою”:
а – обмотки ротора: 1 – пускова обмотка; 2 – робоча обмотка;
3 – осердя ротора; б – механічні характеристики двигуна

Таким чином, в роторі асинхронного двигуна з подвійною “білячою кліткою”, пусковий струм статора обмежується завдяки значному активному опору пускової обмотки та великому індуктивному опору робочої обмотки ротора. В момент пуску пусковий струм $I_{1п} = (3-5) I_{1ном}$, а пусковий момент двигуна відповідно становить $M_{п} = (2-3) M_{ном}$.

10.9. Реверсування та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Реверсування двигуна – це змінення напрямку обертання на протилежне. Ротор захоплюється полем, що обертається, напрямком якого визначається порядком чергування фаз трифазної обмотки статора. Отже, для реверсування асинхронного двигуна необхідно змінити напрямок обертання його магнітного поля. Для цього достатньо поміняти місцями будь-які два провідники, що з’єднують трифазну обмотку статора з мережею.

Для обрання способу регулювання частоти обертання скористаємось формулами $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ та, звідки отримуємо частоту обертання ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p}(1 - s). \quad (10.34)$$

Отже, частота обертання асинхронного двигуна пропорційна частоті змінного струму, яка живить обмотку статора, зворотно пропорційна кількості пар полюсів статора та зменшується зі збільшенням ковзання. Внаслідок цього реалізуються частотне, полюсне та роторне регулювання.

Частотне регулювання здійснюється змінням частоти f_1 мережі підведеної напруги і забезпечує регулювання частоти обертання асинхронного двигуна в широких межах. Однак частота промислової мережі постійна і становить 50 Гц.

Змінення частоти можна здійснити або змінням частоти обертання синхронного генератора, який живить мережу, але це можливо лише в автономних пристроях, або з використанням перетворювача частоти (тиристорні та транзисторні частотні перетворювачі). Такі перетворювачі частоти вмикаються між трифазною мережею з частотою 50 Гц та асинхронним двигуном. Останній спосіб є перспективним, але й досить коштовним. Надійність цих напівпровідникових перетворювачів ще є недостатньо високою.

Полюсне регулювання здійснюється зміною кількості пар полюсів p . При цьому здійснюється ступеневе регулювання обертів.

Технічно цей спосіб можна реалізувати таким чином:

а) в пазах дві обмотки статора з різним числом p . Але це невигідно, оскільки збільшує вартість і розміри двигуна, крім того, в кожний момент працює тільки одна обмотка;

б) перемиканням катушок змінювати ширину полюсів статорного поля (рис. 10.15). У першому випадку (рис. 10.15, а) катушки кожної фази ввімкнені послідовно, а у другому (рис. 10.15, б) – паралельно. У результаті змінюється напрямок струму в провідниках, з яких складається обмотка фази, і топографія магнітного поля стає іншою. В першому випадку магнітне число пар полюсів $p = 2$,

а швидкість обертання магнітного поля статора $n_1 = 1500$ об/хв, у другому випадку $p = 1$, а $n_1 = 3000$ об/хв під час під'єднання до джерела промислової частоти. Це так звані *багатошвидкісні двигуни*.

Роторне регулювання:

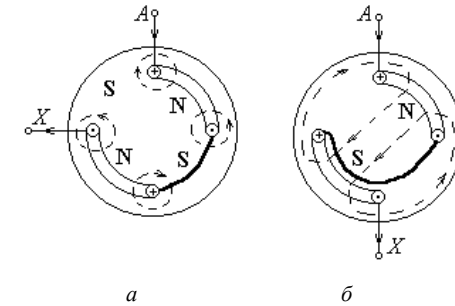


Рис. 10.15. Полюсне регулювання частоти обертання двигуна:
а – послідовне ввімкнення; б – паралельне ввімкнення катушок

а) реалізують введенням реостата R_d у коло обмотки ротора з опором R_2 (рис. 10.16, а);

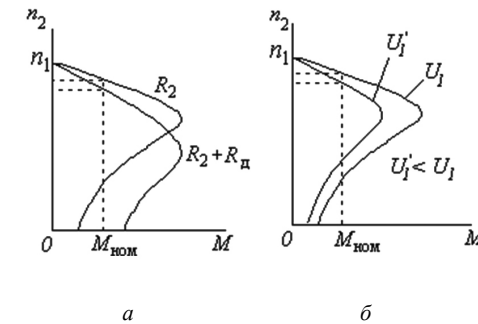


Рис.10.16. Роторне регулювання частоти обертання двигуна:
а – введення реостата R_d ; б – зміння напруги U_1

За такого регулювання можна змінювати швидкість асинхронного двигуна у незначному діапазоні 3...5 %.

б) змінням напруги U_1 , підведеної до двигуна.

У разі зменшення напруги оберти також не сильно знижуються $U \downarrow \Rightarrow n_2 \downarrow$. Але при цьому істотно зменшується і момент на валу $M \sim U^2$. Тому таке регулювання можна здійснювати в режимі НХ.

На рис. 10.16 діапазон зміни частоти обертання ротора зображений на вертикальній осі двома штриховими лініями.

10.10. Гальмівні режими асинхронного двигуна

В умовах експлуатації, особливо в автоматизованому приводі з циклічним характером роботи, часто виникає необхідність гальмування двигуна з метою пришвидшити його зупинку. Тоді гальмування здійснюється за допомогою механічних та електромеханічних гальм, а також електричними засобами.

Розглянемо електричні способи гальмування, які відрізняються простотою, зручністю, надійністю та не вимагають додаткового обладнання. Для електричного гальмування використовуються властивості електродвигуна розвивати гальмівний момент у спеціальних режимах.

Гальмування через противімкнення відбувається у тому випадку, коли ротор під дією зовнішнього моменту обертається проти магнітного поля машини.

Практично таке гальмування здійснюється перемиканням на ходу двигуна двох фаз обмотки статора, що призводить до швидкого змінення напрямку обертання поля, діючого проти ротора, що обертається по інерції. За швидкості обертання, що дорівнює нулю, необхідно вимкнути двигун від мережі, інакше двигун почне розганятись у протилежний бік.

Недоліки гальмування через противімкнення полягають у підвищеному споживання електроенергії від мережі та можливого перегрівання обмоток двигуна.

Генераторне гальмування супроводжується віддаванням двигуном енергії у мережу й тому ще називається рекуперативним. Генераторний режим можливий за умови, якщо ротор буде обганяти магнітне поле статора ($n_2 > n_1$), що відповідає від'ємному ковзанню. Через від'ємне ковзання в режимі генераторного гальмування максимальний момент має більше значення, ніж у режимі двигуна.

Генераторне гальмування асинхронного двигуна можливо також реалізувати, якщо асинхронний двигун перемкнати на ходу на меншу кількість пар полюсів: було наприклад ($p = 1$, $n_1 = 3000$ об/хв), а стане ($p = 2$, $n_1 = 1500$ об/хв). Це неповне гальмування.

У цьому режимі кінетична енергія обертального ротора та робочої машини віддається в мережу у вигляді електроенергії.

Динамічне гальмування асинхронного двигуна здійснюється вимкненням його обмотки статора від мережі та під'єднанням її до джерела постійного струму. Провідники обмотки короткозамкненого ротора асинхронного двигуна, що обертається по інерції, будуть перетинати постійне й нерухоме у просторі магнітне поле статора, і в них виникнуть індукційні струми, взаємодія яких з полем машини створює гальмівний момент.

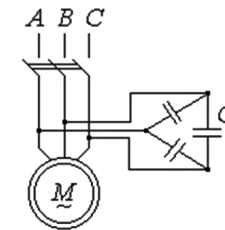


Рис. 10.17. Схема конденсаторного гальмування двигуна

Конденсаторне гальмування застосовується відносно рідко для асинхронних двигунів невеликої потужності.

Асинхронний двигун може працювати у режимі генератора зі самозбудженням від паралельно ввімкненої батареї конденсаторів C (рис. 10.17). Однак при цьому гальмування відбувається не до повної зупинки (до $0,2 \dots 0,6 n_1$). Остаточню ($n_1 = 0$) двигун можна загальмувати динамічним гальмуванням або закорочуванням статорної обмотки.

10.11. Однофазні асинхронні двигуни

Однофазні асинхронні двигуни широко застосовуються в автоматизованих пристроях, електроприводах станків малої потужності та інструменту, побутових пристроях і машинах, де непотрібно регулювання частоти обертання. Це двигуни невеликої потужності (до 600 Вт). Вони мають низький ККД (25–70 %) і малий коефіцієнт потужності ($\cos\varphi = 0,6 \dots 0,7$).

Однофазний асинхронний двигун складається зі статора з однофазною робочою обмоткою. Змінний струм, проходячи по однофазній обмотці статора, утворює пульсуюче магнітне поле:

$$B(\alpha, t) = B_m \cos \alpha \cdot \sin \omega t, \quad (10.35)$$

де α – просторова координата індукції магнітного потоку вздовж окружності по внутрішньому діаметру статора.

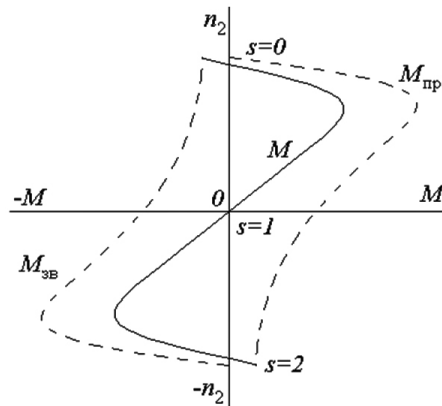


Рис. 10.18. Механічна характеристика однофазного асинхронного двигуна

Пульсуюче магнітне поле представимо двома магнітними полями, що обертаються з однаковою частотою, але у протилежних напрямках:

$$B(\alpha, t) = B_m \cos \alpha \cdot \sin \omega t = \frac{1}{2} B_m \sin(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} B_m \sin(\omega t + \alpha) = B_{\text{пр}} + B_{\text{зв}}, \quad (10.36)$$

де $B_{\text{пр}}$ і $B_{\text{зв}}$ – відповідно індукції прямого і зворотного магнітного поля.

Під дією двох полів $B_{\text{пр}}$ і $B_{\text{зв}}$ утворюються і два моменти $M_{\text{пр}}$ і $M_{\text{обр}}$. (рис. 10.18). Оскільки електромагнітні моменти $M_{\text{пр}}$ і $M_{\text{зв}}$ діють зустрічно за однакової частоти обертання, то їх результуючий момент, діючий на ротор однофазного АД, дорівнює:

$$M(n) = M_{\text{пр}}(n) - M_{\text{зв}}(n). \quad (10.37)$$

У момент пуску $M(0) = 0$ і ротор залишається нерухомим. Тому для двигуна потрібен пускач. Однофазний асинхронний двигун не має пускового моменту, але має обертальний момент за будь-якої іншої швидкості ротора, якщо ротор якимось способом приведений у обертання. Він не має пускового моменту, але має обертальний момент за будь-якої іншої швидкості ротора, якщо ротор якимось способом приведений у обертання. З цієї ж причини в умовах експлуатації працюючого трифазного асинхронного двигуна у випадку обриву однієї фази (або перегорання запобіжника) трифазний двигун переходить у режим однофазного.

При цьому асинхронний двигун не зупиниться і буде працювати на двох фазах. Але виникає перевантаження асинхронного двигуна, що супроводжується перегріванням його ізоляції, і в подальшому двигун виходить з ладу. Крім того, у разі обриву фази статорної обмотки виникає характерне гудіння, значно зростає струм та збільшується перегрівання і знижується частота обертання.

Наявність зворотного (інверсного) поля призводить до утворення гальмівного (інверсного) моменту $M_{\text{зв}}$. Інверсне поле обертається відносно ротора майже з подвійною частотою (~100 Гц), а пряме поле має частоту $f = 2 \dots 5$ Гц. Тому різко зростають втрати у сталі. Зростають також втрати у міді, оскільки обмотка статора обертає два поля: у роторі проходять два струми. Це відбивається на $\cos \varphi$, який у однофазних двигунів нижче, ніж у трифазних, оскільки одне з полів не робоче. Прийнято вважати, що однофазний асинхронний двигун дає 2/3 потужності трифазного двигуна тих самих габаритів.

Однофазний асинхронний двигун із пусковою обмоткою.

Щоб магнітне поле статора стало обертальним, потрібно, щоб крім основної робочої обмотки $L_{\text{р}}$, була ще одна допоміжна пускова обмотка $L_{\text{п}}$, вісь якої зсунута у просторі відносно осі робочої обмотки на 90° (рис. 10.19).

Струми у цих обмотках I_p і I_n мають бути зсунуті по фазі відносно один одного на електричний кут 90° . Обидві обмотки утворюють пульсуючі нерухомі магнітні поля в повітряному зазорі машини, зворотні хвилі яких компенсують одна одну, тому що знаходяться у протифазі, а прямі хвилі співпадають по фазі й утворюють результуючу хвилю, яка рухається у прямому напрямку.

Конструктивно $2/3$ пазів займає робоча обмотка, а $1/3$ – пускова обмотка. При цьому в пускову обмотку асинхронного двигуна вмикається елемент, що зсуває фазу – активний, індуктивний або ємнісний опір.

Після пуску двигуна ця обмотка відмикається від мережі автоматично за допомогою центробіжного вимикача, спеціального реле або вручну кнопковим вимикачем.

Найкращі пускові властивості мають однофазні асинхронні двигуни з використанням в колі пускової обмотки конденсатора (рис. 10.19).

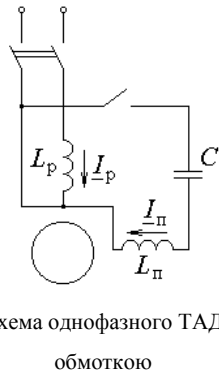


Рис. 10.19. Схема однофазного ТАД з пусковою обмоткою

Під час використання трифазних асинхронних двигунів для роботи від однофазної мережі дві фази обмотки статора, з'єднані послідовно, можна зробити робочими, а третю – пусковою (рис. 10.20).

Для цього у пускову обмотку послідовно під'єднують конденсатор зі значною ємністю: 40–80 мкФ на 1 кВт потужності двигуна. При цьому потужність двигуна зменшується приблизно на 30 %.

Необхідна ємність робочого конденсатора C_p : у разі сполучення у “трикутник” робоча ємність дорівнює:

$$C_p = 4800 \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \text{ мкФ};$$

у разі сполучення у “зірку” робоча ємність дорівнює:

$$C_p = 2800 \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \text{ мкФ}.$$

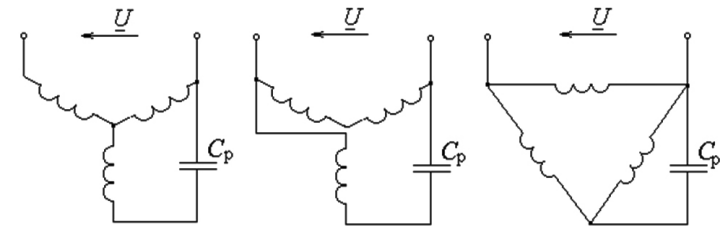


Рис. 10.20. Схеми з'єднання статорних обмоток трифазного асинхронного двигуна під час під'єднання до однофазної мережі

Під час використання пускового конденсатора його ємність дорівнює:

$$C_n = (2...3)C_p.$$

Конденсаторний асинхронний двигун.

Такий асинхронний двигун відрізняється від однофазного асинхронного з конденсаторним пуском (рис. 10.19) лише тим, що після пуску двигуна пускова обмотка не відмикається – вона розрахована на тривалу роботу. В цьому випадку пускова і робоча обмотки у статорі займають однакову кількість пазів. Двигун працює з обертовим моментом, і тому за своїми властивостями наближається до трифазного асинхронного двигуна.

Щоб збільшити пусковий момент конденсаторного двигуна, паралельно робочому конденсатору вмикають на період пуску додатковий пусковий конденсатор великої ємності.

10.12. Лінійні асинхронні двигуни

У лінійних асинхронних двигунах (ЛАД) електрична енергія перетворюється у механічну енергію прямолінійного переміщення робочого органа машин або механізмів. У цих агрегатах ЛАД мають значні переваги перед звичайними двигунами з обертовим ротором, оскільки відсутня громіздка проміжна ланка, яка перетворює обертовий рух у поступальний або зворотно-поступальний, що істотно зменшує втрати енергії, збільшує ККД та надійність установки. Лінійний асинхронний двигун може бути виконаний безконтактним між статором і вторинним елементом двигуна.

ЛАД поділяються на машини, що мають прямолінійний рух поперечного магнітного поля (плоскі двигуни) і на ті, що мають рух магнітного поля по дузі (циліндричні двигуни). ЛАД складається з нерухомого статора (рис. 10.21), до складу якого входить сталеве осердя 1, в якому укладена трифазна обмотка 2, і бігуна, який складається з осердя 3 із короткозамкненою обмоткою 4 типа “біляча клітка”.

Статор – первинний елемент плоского двигуна, містить трифазну обмотку, з’єднану “зіркою” або “трикутником” і розгорнуту у площину (в плоских машинах), і плоске сталеве осердя, в пазах якого розміщена ця обмотка.

Бігун – вторинний елемент двигуна, частина, що прямолінійно рухається зі швидкістю V_2 , спричиняє до руху робочий орган якогось пристрою.

Довжина розгортки статора розраховується за формулою: $l = 2 \cdot \pi \cdot \tau$,

де τ – полюсне ділення.

Лінійна швидкість магнітного поля статора: $V_1 = 2\pi \cdot f_1$,

де f_1 – частота струму статора.

Формула ковзання ЛАД має такий вигляд:

$$s = \frac{V_1 - V_2}{V_1}. \quad (10.38)$$

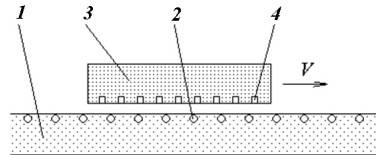


Рис. 10.21. Схема будови ЛАД:

1 – сталеве осердя; 2 – трифазна

обмотка; 3 – осердя бігуна;

4 – короткозамкнена обмотка;

За розмірами ЛАД бувають з коротким статором і коротким бігуном. За типом магнітопровода первинної частини плоскі ЛАД можуть бути виконані з одно- та двостороннім статором. У циліндричному ЛАД поверхні статора та ротора виконуються циліндричними, і бігун розміщується всередині статора.

Обмотки ЛАД з’єднуються за тими ж схемами, що й обмотки звичайних асинхронних двигунів.

10.13. Основні типи асинхронних двигунів, що застосовуються в галузях промисловості та у військовій справі

Асинхронні двигуни є основним типом сучасних промислових двигунів із масовим застосуванням в усіх галузях промисловості та побуту. Їх випуск заводами має характер серійного конвеєрного виробництва (під серією мають на увазі низку машин однакової конструкції з уніфікованими деталями та закономірно зростаючою потужністю й геометричними розмірами). Розглянемо деякі з них.

Трифазні загальнопромислові асинхронні двигуни серії АО10 з короткозамкненим ротором (рис. 10.22, а) призначені для тривалого режиму роботи у складі привода різних механізмів: вентиляторів, насосів, димососів, млинів, дробарок, станків та інших пристроїв.

Малошумні трифазні асинхронні двошвидкісні електродвигуни серії 4 АЛ (рис. 10.22, б) призначені для повторно-короткочасного режиму роботи у складі приводів вантажних, вантажопасажирських та пасажирських ліфтів для жилих, громадських та промислових споруд.

Трифазні загальнопромислові асинхронні двигуни серії А4 призначені для тривалого режиму роботи (рис. 10.22, в).

Високовольтні електродвигуни серії А4 призначені для роботи у складі привода різних механізмів від мережі змінного струму напругою 6 та 3 кВ для потреб різних галузей промисловості, електростанцій різного типу, в тому числі атомних.

Високовольтні АЕ4 призначені для роботи у складі п’ятимашинних перетворювальних агрегатів екскаваторів.

Двигуни однофазні серії АІР (рис. 10.22, *з*) призначені для комплектації електроприводів побутового та промислового призначення різних механізмів (деревооброблювальних станків, насосів та ін.). Однофазні двигуни випускаються в тих же конструкційних виконаннях, що й двигуни серії АІР і відповідають їм за своїми основними розмірами. Двигуни працюють з приєднаним робочим конденсатором.

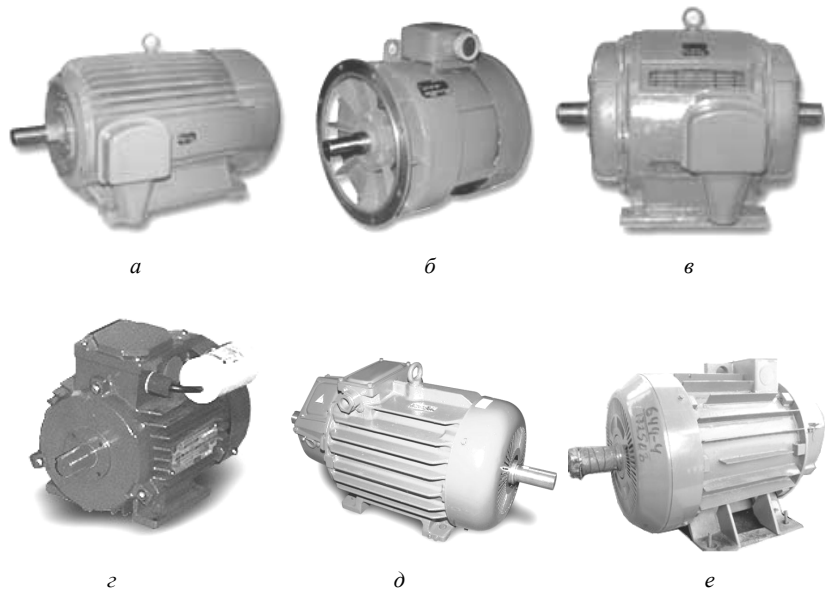


Рис. 10.22. Загальний вигляд асинхронних двигунів:

а – серія АО10; *б* – серія 4АЛ; *в* – серія А4;
г – серія АІР; *д* – серії МТ, МТН, 4МТМ, 4МТН; *е* – серії МТКФ, МТКН, 4МТКН

Електродвигуни типу МТ, МТН, 4 МТМ, 4 МТН із фазним ротором працюють у приводах металургійних агрегатів і підйомно-транспортних механізмах (рис. 10.22, *д*).

Двигуни серії МТКФ, МТКН, 4МТКН із короткозамкненим ротором, що обдувається в закритому виконанні, призначені для роботи за підвищеної температури зовнішнього середовища до $+40^{\circ}\text{C}$ напругою 220/380, 230/400, 240/415, 380/660, 380, 415, 500 В (рис. 10.22, *е*). Вони застосовуються в житловому та

капітальному будівництві, енергетиці, на транспорті, в гірничодобувній і металургійній галузях промисловості.

Широке розповсюдження в системах стабілізації танкового озброєння набули асинхронні двигуни оберненої конструкції (рис. 10.23), наприклад, електродвигуни (гіромотори) гіроскопічних систем.

Гіромотор – це трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим зовнішнім ротором і внутрішнім статором. Ротори гіроскопів приводяться в обертання високошвидкісним обертовим полем за рахунок підвищених частот змінної напруги (400, 500, 1000 Гц) джерел живлення.

На рис. 10.23 зображено загальну будову гіроскопічного двигуна.

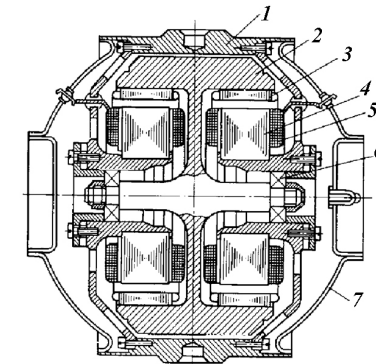


Рис. 10.23. Загальна будова гіроскопічного двигуна:

1 – корпус; *2* – маховик; *3* – магнітопровід ротора з “білячою кліткою”;
4 – магнітопровід статора; *5* – обмотка статора; *6* – шарикопідшипник;
7 – кожух герметизованої камери

Ці двигуни працюють без механічного навантаження на валу, тож електромагнітний момент гіроскопічного двигуна під час стаціонарного режиму має бути розрахованим лише на переборення тертя в підшипниках і тертя деталей об повітря.

Для зменшення втрат на тертя в двигуні використовують надзвичайно якісні підшипники, ротори виконують з високою якістю обробки, балансують та

розміщують у герметичних камерах із вакуумом або заповнених розрядженим газом (гелій, водень тощо).

Для підвищення динамічного моменту гіроскопічні двигуни повинні мати великі оберти ($n_2 > 20000$ об/хв.). Для цього гіромотори виконують з одною парою полюсів p і живлять від джерела трифазної напруги з підвищеною частотою: 400, 500, 1000 Гц.

Виконання двигунів із високою швидкістю обертання дає можливість зменшити габарити та масу машин.

Для підвищення точності роботи гіроскопічного пристрою двигуни повинні мати дуже жорстку характеристику (відповідно, малий опір обмотки ротора) та стабільну напругу джерела за величиною і частотою.

Для скорочення часу, призначеного на розгін, ці двигуни виконують з великим пусковим моментом.

Практичне використання в системах стабілізації знайшли гіромотори типу ГМА-411 (рис. 10.24).

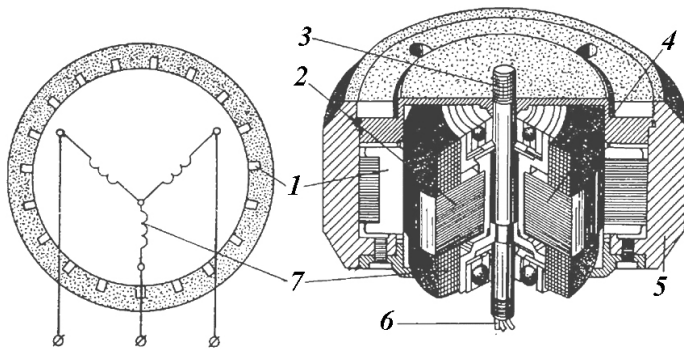


Рис. 10.24. Гіромотор ГМА-411 і його електрична схема:

1 стрижень обмотки ротора; 2 статор; 3 вісь гіромотора; 4 пакет електротехнічної сталі статора; 5 маховик ротора; 6 електропровідники живлення обмотки статора; 7 трифазна обмотка статора

10.14. Приклади розрахунку параметрів і характеристик

асинхронних двигунів

Приклад 1. Трифазний асинхронний двигун ввімкнений у трифазну мережу з частотою $f_1 = 50$ Гц. Технічні дані двигуна: кількість полюсів $2p = 6$; номінальне ковзання $S_{\text{ном}} = 0,03$; перевантажувальна здатність $\lambda_M = 2,2$. Визначити синхронну частоту обертання поля статора; номінальну і критичну частоти обертання ротора; діапазон частот, за яких можлива стійка робота двигуна.

Розв'язання. Синхронна частота обертання поля статора:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Номінальна частота обертання ротора:

$$n_2 = n_1 (1 - S_{\text{ном}}) = 1000(1 - 0,03) = 970 \text{ об/хв.}$$

Критичне ковзання:

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}} (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0,03(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,125.$$

Критична частота обертання ротора:

$$n_{\text{кр}} = n_1 (1 - S_{\text{кр}}) = 1000(1 - 0,125) = 875 \text{ об/хв.}$$

Стійка робота двигуна можлива в діапазоні частот обертання від $n_1 = 1000$ об/хв. до $n_{\text{кр}} = 875$ об/хв.

Приклад 2. Трифазний асинхронний двигун має такі технічні дані: номінальна потужність на валу двигуна $P_{2\text{ном}} = 0,55$ кВт; номінальна лінійна напруга $U_1 = 380/220$ В за частоти $f_1 = 50$ Гц; номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,65$; номінальний ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,64$; кратність пускового струму $m_I = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 3,5$; лінійна напруга мережі $U_1 = 220$ В. Визначити номінальну потужність $P_{1\text{ном}}$, що споживається двигуном із мережі; номінальний $I_{\text{ном}}$ і пусковий $I_{\text{пуск}}$ струми двигуна.

Розв'язання. Номінальна потужність, що споживається двигуном із мережі:

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{0,55}{0,64} = 0,859 \text{ кВт.}$$

У разі заданої напруги мережі $U_1 = 220$ В фази обмотки статора з'єднуються „трикутником” (рис. 10.25, а).

Номинальний лінійний струм двигуна:

$$I_{\text{л ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{м}} \cos \varphi_{1\text{ном}} \eta_{\text{ном}}} = \frac{0,55 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,65 \cdot 0,64} = 3,47 \text{ А.}$$

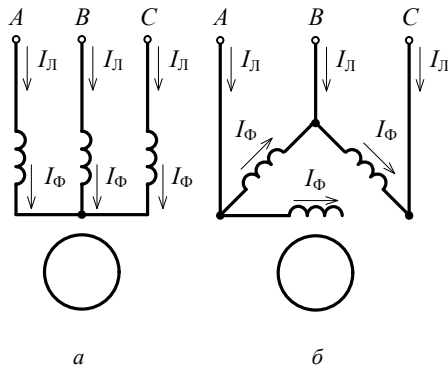


Рисунок. 10.25. Способи з'єднання трифазної обмотки статора:

a – з'єднання зіркою; *б* – з'єднання трикутником

У разі з'єднання обмотки статора „трикутником” номінальний фазний струм:

$$I_{\text{ф ном}} = \frac{I_{\text{л ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{3,47}{1,73} = 2 \text{ А.}$$

Пускові струми двигуна:

– лінійний $I_{\text{л пуск}} = m_I I_{\text{л ном}} = 3,5 \cdot 3,47 = 12,2 \text{ А};$

– фазний $I_{\text{ф пуск}} = m_I I_{\text{ф ном}} = 3,5 \cdot 2 = 7 \text{ А.}$

Приклад 3. Трифазний асинхронний двигун вмикається в мережу з лінійною напругою $U_1 = 380 \text{ В}$ і має такі дані: номінальна потужність на валу двигуна $P_{2\text{ном}} = 11 \text{ кВт}$; номінальна напруга $U_1 = 380/220 \text{ В}$ за частоти $f_1 = 50 \text{ Гц}$; номінальний ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,88$; номінальне ковзання $S_{\text{ном}} = 0,04$; кількість полюсів $2p = 4$. Визначити номінальні: лінійний $I_{\text{л ном}}$ і фазний $I_{\text{ф ном}}$ струми двигуна; частоту обертання поля статора n_1 ; частоту обертання ротора $n_{2\text{ном}}$; обертальний момент $M_{\text{ном}}$.

Розв'язання. Для заданої лінійної напруги мережі $U_1 = 380 \text{ В}$ обмотку статора необхідно з'єднати „зіркою” (рис. 10.25, *б*).

У разі цього номінальні лінійний і фазний струми двигуна однакові:

$$I_{\text{л ном}} = I_{\text{ф ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{м}} \cos \varphi_{1\text{ном}} \eta_{\text{ном}}} = \frac{11 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 21,8 \text{ А.}$$

Синхронна частота обертання поля статора:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв.}$$

Номинальна частота обертання ротора:

$$n_{2\text{ном}} = n_1 (1 - S_{\text{ном}}) = 1500 (1 - 0,04) = 1440 \text{ об/хв.}$$

Номинальний обертальний момент:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}} = 9,55 \frac{11 \cdot 10^3}{1440} = 72,95 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Приклад 4. Трифазний асинхронний двигун із номінальними потужністю $P_{2\text{ном}} = 0,55 \text{ кВт}$ і частотою обертання поля статора $n_{1\text{ном}} = 750 \text{ об/хв}$ має кратність максимального моменту $\lambda_M = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 1,7$; номінальне ковзання $S_{\text{ном}} = 0,091$.

Розрахувати і побудувати механічні характеристики двигуна $n_2(M)$ і $M(S)$ за $U_1 = 380 \text{ В} = \text{const}$; визначити пусковий момент $M_{\text{пуск}}$ і його кратність $k_{\text{п}}$ відносно до номінального моменту.

Розв'язання. Механічні характеристики розраховуються за умови, що $U_1 = \text{const}$, на основі виразів:

$$M = \frac{2 M_{\text{max}}}{S/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S}; \quad n_2 = n_1 (1 - S); \quad S = S \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right);$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}}; \quad M_{\text{max}} = \lambda_M M_{\text{ном}}.$$

За даними задачі і зазначених формул визначаємо:

$$n_{2\text{ном}} = 682 \text{ об/хв}; \quad S_{\text{кр}} = 0,28; \quad M_{\text{ном}} = 7,7 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{max}} = 13,1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Задаючись значеннями S від 0 до 1, визначаємо M і n_2 . Результати розрахунків зведені у табл. 10.1.

Пусковий момент двигуна визначається за $S = 1$ і складає $M_{\text{пуск}} = 6,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а його кратність:

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{6,8}{7,7} = 0,884.$$

Таблиця 10.1

Механічні характеристики асинхронного двигуна

S	0	0,05	0,091	0,2	0,28	0,4	0,6	0,8	1,0
$n_2, \text{об/х}$ в	750	712,5	682	600	540	450	300	150	0
$M, \text{Н·м}$	0	4,53	7,7	12,39	13,1	12,31	10,04	8,17	6,8

За даними табл. 10.1 побудуємо механічні характеристики $M(S)$ (рис. 10.26, а) і $n_2(M)$ (рис. 10.26, б) за $U_1 = \text{const}$.

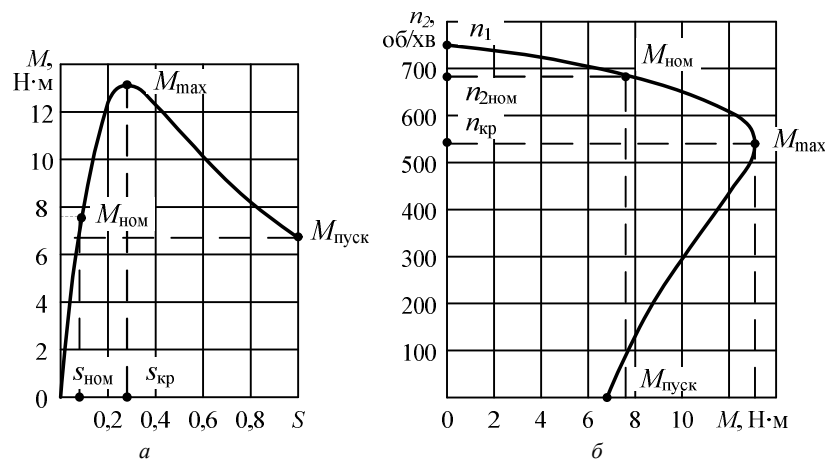


Рисунок 10.26. Механічні характеристики асинхронного двигуна:
а – $M(S)$; б – $n_2(M)$

Контрольні запитання

1. Наведіть загальну будову та принцип дії трифазного асинхронного двигуна.
2. Яка різниця між двигуном із фазним і короткозамкненим ротором?
3. Вкажіть основні фізичні та робочі параметри асинхронного двигуна.
4. Наведіть рівняння електричного стану кіл статора і ротора.
5. Побудуйте енергетичну діаграму втрат і ККД асинхронного двигуна.
6. Побудуйте механічні характеристики $M(s)$, $n_2(M)$ асинхронного двигуна.
7. Вкажіть, які існують способи пуску та регулювання частоти ТАД.

11. ТРИФАЗНІ СИНХРОННІ МАШИНИ

Синхронні машини використовують як генератори, двигуни та компенсатори змінного струму. Найбільше застосовуються трифазні синхронні генератори, які перетворюють на електростанціях механічну енергію первинного двигуна в електроенергію. Генератори менших потужностей використовуються на літаках, автомобілях, кораблях та ін.

Синхронні двигуни, що перетворюють електричну енергію в механічну, у порівнянні з асинхронними використовуються рідше, головним чином у приводах із постійним режимом роботи, де не вимагається регулювання частоти обертання (потужні насоси, вентилятори, компресори, прокатні стани тощо).

Синхронні компенсатори застосовуються в енергосистемах для компенсації індуктивного зсуву фаз, де вони є генераторами реактивної потужності ємнісного характеру.

11.1. Будова синхронних машин

Синхронною (з грецької “одночасною”) називають електричну машину змінного струму, ротор якої має частоту обертання магнітного поля статора. Останню називають синхронною та обчислюють за формулою:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (11.1)$$

де p – кількість пар полюсів статора.

За частоти $f = 50$ Гц синхронна частота обертання постійна і визначається кількістю пар полюсів машини $n_0 = \frac{3000}{p}$.

Синхронна машина складається з нерухомого статора й обертового ротора. Статор синхронної машини такий же, як і в асинхронній машині, тобто він має шихтоване сталеве осердя, у внутрішніх пазах якого укладена трифазна обмотка. Ротор синхронної машини – це система електромагнітів постійного струму, які утворюють