

Лекція №11. Електроприводи змінного струму.

11.1. Принцип дії асинхронної машини. Моделі асинхронного електроприводу.

Один із елементів машини – статор використовується для створення магнітного поля, що обертається з певною швидкістю, а в замкнених провідних пасивних контурах іншого елемента – ротора наводяться ЕРС, які викликають протікання струмів та утворення сил (моментів) при їх взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному – асинхронному русі ротора відносно поля, що і дало машинам даного типу назву – асинхронні.

Статор, як правило, виконаний у вигляді декількох розміщених в пазах котушок, а ротор – у вигляді «білячої клітки» (короткозамкнений ротор) або у вигляді декількох котушок (фазний ротор), які з'єднані між собою, виведені на кільця, що розміщені на валу, і з допомогою ковзаючих по ним щіток можуть бути замкнені на зовнішні резистори.

Складність повного математичного опису процесів в асинхронній машині полягає в тому, що:

1. Всі напруги, струми, потокозчеплення – змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами.

2. Взаємодіють контури, які рухаються, взаємне розміщення яких змінюється в просторі.

3. Магнітний потік нелінійно зв'язаний з струмом намагнічування (проявляється насичення магнітного кола), активні опори роторного кола залежать від частоти (ефект витіснення струму), опори всіх кіл залежать від температури тощо.

В загальному випадку для машини, що має p пар полюсів ($p=1,2,3\dots$), синхронна кутова швидкість ω_0 , рад/с, тобто швидкість поля, визначається за формулою:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (11.1)$$

для частоти обертання n_0 , об/хв., будемо мати:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (11.2)$$

тобто, під час живлення від мережі $f_1=50$ Гц синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600 ... об/хв. в залежності від конструктивного виконання машини.

Вирази (11.1) та (11.2) мають принциповий характер: вони показують, що для даної машини є лише одна можливість змінювати швидкість поля – змінювати частоту джерела живлення f_1 .

Процеси при $\omega = \omega_0$.

Нехай ротор обертається зі швидкістю ω_0 , тобто його обмотки не перетинають силових ліній магнітного поля і він не здійснює суттєвого впливу на процеси.

При грубому наближенні можна представити обмотку фази статора як деяку ідеальну котушку, до якої прикладена змінна напруга $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$. Як правило, напругу та інші змінні, що змінюються синусоїдально позначають великими літерами, якщо інтерес представляють їх діючі значення, або додають точку зверху, якщо розглядають вектори, що мають амплітуду $U_m = \sqrt{2}U$ та фазу ϕ .

Прикладена напруга \dot{U}_1 врівноважується ЕРС самоіндукції \dot{E}_1 (рис. 11.1,а,б):

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{об}, \quad (11.3)$$

де w_1 – число витків обмотки; $k_{об}$ – коефіцієнт, що залежить від конкретного виконання обмотки.

Наближено можна рахувати, що магнітний потік визначається прикладеною напругою, частотою та параметрами обмотки:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об}} \equiv \frac{U_1}{f_1}. \quad (11.4)$$

Струм в обмотці (фазі) статора – струм намагнічення визначається тільки магнітним потоком та характеристикою намагнічення машини (рис.11.1,в):

$$I_1 = I_{10} = I_\mu.$$

В серійних машинах при $U_1 = U_{1н}$ та $f_1 = f_{1н}$, тобто при номінальному магнітному потоці струм холостого ходу I_{10} складає, як правило, 30% – 40% від номінального струму статора $I_{1н}$.

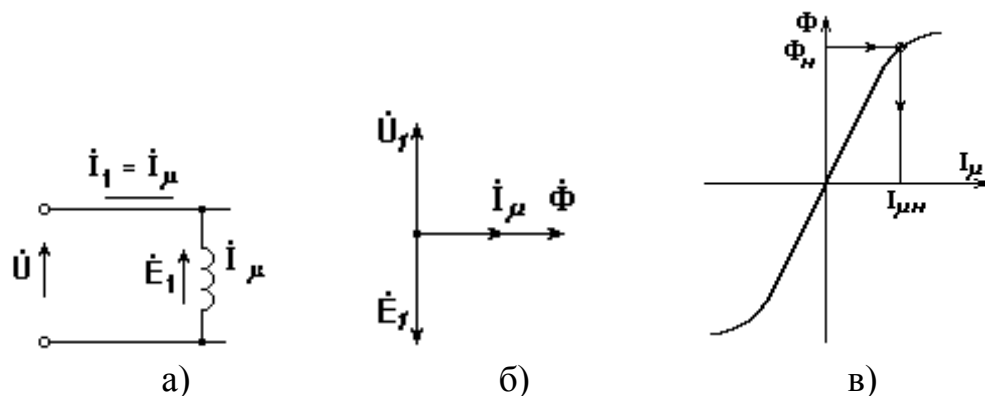


Рис.11.1.

Процеси під навантаженням.

При навантаженні вала $\omega \neq \omega_0$ відмінність швидкостей ω та ω_0 прийнято характеризувати ковзанням:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (11.5)$$

Тоді в роторному колі з'явиться ЕРС E_2' , що наведена по закону електромагнітної індукції та рівна:

$$E_2' = E_1 \cdot s \quad (11.6)$$

штрихом позначені приведені величини, що враховують неоднаковість обмоток статора та ротора. Частота наведеної ЕРС складає:

$$f_2 = f_1 \cdot s \quad (11.7)$$

Струм I_2' в роторному колі, що має опір R_2' та індуктивність L_2' , знаходиться таким чином:

$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (2\pi \cdot f_2 \cdot L_2')^2}}$$

або після простих перетворень:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}} \quad (11.8)$$

де X_2' – індуктивний опір розсіяння вторинного кола при частоті f_1 .

Дане рівняння відповідає традиційній схемі заміщення фази асинхронного двигуна – рис.11.2, в якій враховані параметри статора R_1 та X_1 . Ця проста модель придатна для аналізу статичних режимів при симетричному двигуні з симетричним живленням.

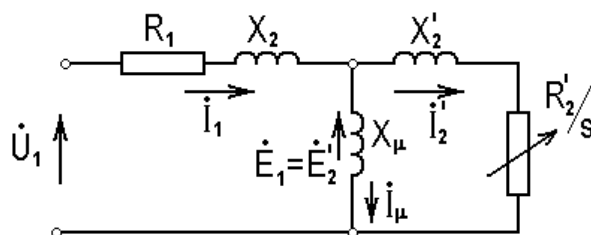


Рис.11.2.

11.2. Механічні характеристики. Енергетичні режими

Для отримання механічної характеристики ще більше спростимо модель – винесемо контур намагнічення на затискачі – рис.11.3,а.

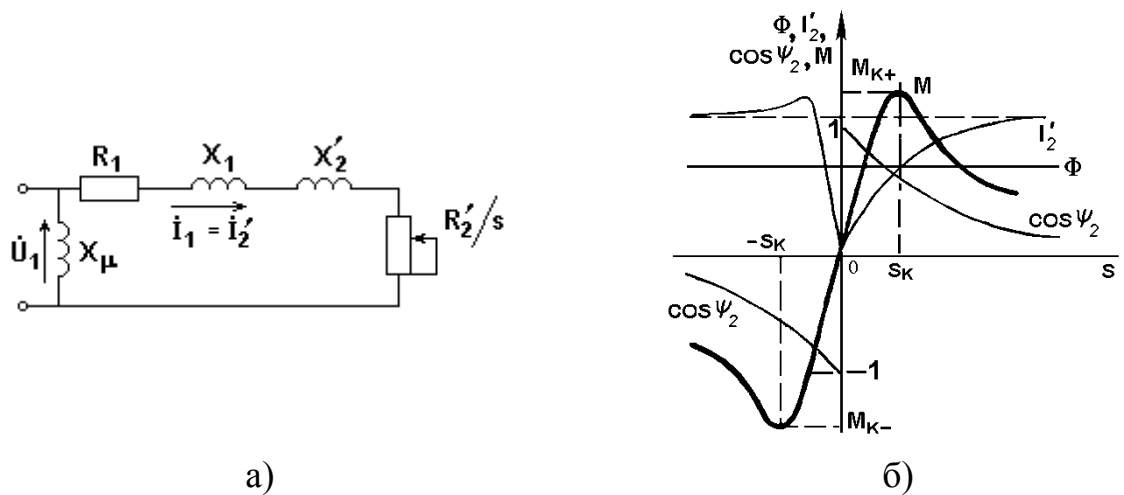


Рис.11.3. Спрощена схема заміщення (а) та характеристики машини (б)

Оскільки

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{2a} = k \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 ,$$

де I_{2a} – активна складова струму ротора; ψ_2 – кут між \dot{E}_2 та \dot{I}_2 ; якісне уявлення про механічну характеристику $M(s)$ можна отримати, простеживши залежність кожного із трьох множників від s .

Магнітний потік Φ в першому наближенні відповідно до (4.4) не залежить від ковзання s – рис. 4.3,б. Струм ротора (4.8) рівний нулю при

$s=0$ і асимптотично прямує до $\frac{U_1}{X_2}$ при $s \rightarrow \pm \infty$ – рис.11.3,б. Останній множник легко визначити по схемі заміщення:

$$\cos \psi_2 = \frac{\frac{R_2'}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}} ,$$

$\cos \psi_2$ близький до ± 1 при малих s і асимптотично прямує до нуля при $s \rightarrow \pm \infty$. Момент, як добуток трьох множників, рівний нулю при $s=0$ ($\omega = \omega_0$ – ідеальний холостий хід), досягає позитивного M_{k+} та негативного M_{k-} максимумів – критичних значень при деяких критичних значеннях ковзання $\pm s_k$, а тоді при $s \rightarrow \pm \infty$ прямує до нуля за рахунок третього множника.

Рівняння механічної характеристики отримаємо, прирівнявши втрати в роторному колі, що виражені через механічні та електричні величини. Потужність, яка споживається з мережі, якщо знехтувати втратами в R_1 , приблизно рівна електромагнітній потужності:

$$P_1 \approx P_{em} = M \cdot \omega_0 ,$$

а потужність на валу визначається як:

$$P_2 = M \cdot \omega$$

Втрати в роторному колі складуть:

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \approx M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot s = P_1 \cdot s , \quad (11.9)$$

або при вираженні їх через електричні величини:

$$\Delta P_2 = 3(I_2')^2 \cdot R_2' ,$$

звідки:

$$M = \frac{3(I_2')^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s} .$$

Підставивши в останній вираз I_2' з формули (11.8) та знайшовши екстремум функції $M = f(s)$ і M_κ та s_κ , що йому відповідають, будемо мати:

$$M_\kappa = \frac{2 M_\kappa (1 + \alpha \cdot s_\kappa)}{\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s} + 2 \alpha \cdot s_\kappa} , \quad (11.10)$$

де $\alpha = \frac{R_1}{R_2'}$:

$$M_\kappa = \frac{3U^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}] } , \quad (11.11)$$

$$s_\kappa = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} . \quad (11.12)$$

На практиці інколи вважають, що $\alpha = 0$, тобто нехтують активним опором обмоток статора. Це, як правило, не призводить до суттєвих похибок при $P_n > 5$ кВт, але може невиправдано погіршити модель при малих потужностях. При $\alpha = 0$ вирази (11.10) – (11.12) мають вигляд (формула Клосса):

$$M = \frac{2 M_\kappa}{\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s}} , \quad (11.10,a)$$

$$M_\kappa = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \cdot X_\kappa} , \quad (11.11,a)$$

$$s_\kappa = \frac{R_2'}{X_\kappa} , \quad (11.12,a)$$

де $X_\kappa = X_1 + X_2'$ – індуктивний опір розсіяння машини.

В рівнянні (11.10,а) при $s \ll s_k$ можна знехтувати першим членом в знаменнику та отримати механічну характеристику на робочій ділянці в вигляді:

$$M \approx \frac{2M_k \cdot s}{s_k} \quad (11.13)$$

Як видно з рис. 11.3,б та виразів (11.10) та (11.10,а), жорсткість механічної характеристики асинхронних двигунів змінна, на робочій ділянці $\beta < 0$, а при $|s| > |s_k|$ – позитивна.

Асинхронний електропривод як і електропривод постійного струму, може працювати в двигунному та трьох гальмівних режимах з таким же, як і в електроприводі постійного струму розподіленням потоків енергії – рис. 11.11.

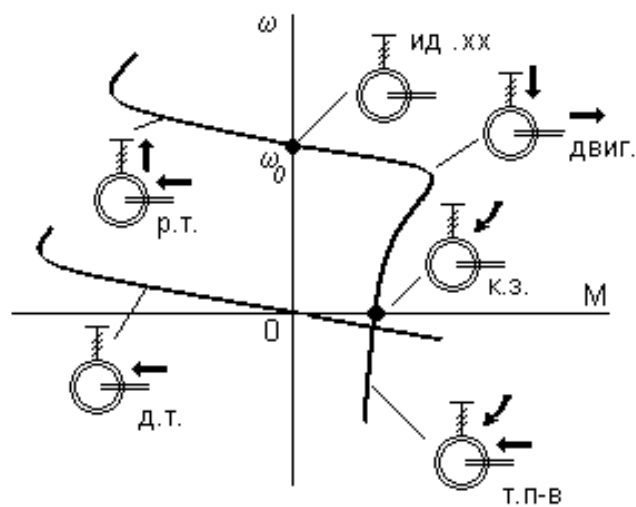


Рис.11.4.

Рекуперативне гальмування здійснюється при обертанні двигуна активним моментом зі швидкістю $\omega > \omega_0$. Цей режим буде мати місце, якщо при обертанні ротора зі швидкістю ω зменшити швидкість обертання поля ω_0 . Роль активного моменту тут буде виконувати момент інерційних мас ротора, що обертається.

Для здійснення гальмування противмиканням необхідно змінити місцями дві будь-які фази статора – рис. 11.5. При цьому, змінюється напрям обертання поля, машина гальмує в режимі противмикання, а після цього реверсується.

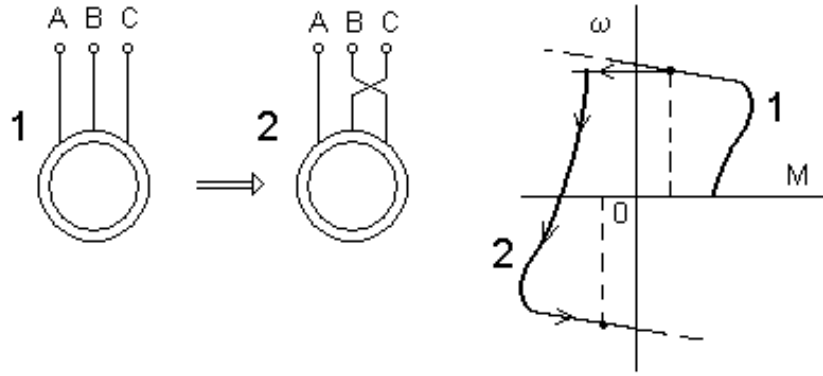


Рис.11.5.

Специфічним є режим динамічного гальмування, яке являє собою генераторний режим відключеного від мережі змінного струму асинхронного двигуна, до статора якого підведений постійний струм I_n . Цей режим застосовується в ряді випадків, коли після відключення двигуна від мережі необхідна його швидка зупинка без реверсу.

Постійний струм, що підводиться до обмотки статора, створює нерухоме в просторі поле. При обертанні ротора в його обмотці наводиться змінна ЕРС, під дією якої протікає змінний струм. Цей струм створює також нерухоме поле.

Складаючись, поля статора та ротора утворюють результуюче поле, в результаті взаємодії з яким струму ротора виникає гальмівний момент. Енергія, що надходить з валу двигуна, розсіюється при цьому в опорах роторного кола.

В режимі динамічного гальмування поле статора нерухоме, ковзання записується як:

$$s = \frac{\omega}{\omega_0}$$

і справедливі співвідношення для механічної характеристики, що аналогічні (11.10,а) – (11.12,а):

$$M = \frac{2 M_{к.м}}{\frac{s}{s_{к.м}} + \frac{s_{к.м}}{s}}, \quad (11.14)$$

$$M_{к.м} = \frac{3 I_{екв}^2 \cdot X_{\mu}^2}{2 \omega_0 \cdot (X_{\mu} + X_2')} \quad (11.15)$$

де $I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_n$ – при з'єднанні обмоток статора в зірку; $I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_n$ – при з'єднанні обмоток статора в трикутник.

$$s_{к.м} = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (11.16)$$

Оскільки, при ненасиченій машині $X_{\mu} \gg \{X'_{2\sigma}\}$, критичне ковзання в режимі динамічного гальмування $s_{к.т}$ значно менше $s_{к}$.

11.3. Номінальні дані асинхронних електроприводів

На емблемі або в паспорті асинхронного двигуна, як правило, вказані номінальні лінійні напруги при з'єднанні обмоток в зірку та трикутник U_{1Y}/U_{Δ} , струми I_{1Y}/I_{Δ} , частота $f_{1н}$, потужність на валу P_n , частота обертання n_n , ККД η_n , $\cos \phi_n$.

Для двигунів з короткозамкненим ротором в каталозі приводяться кратності пускового струму $k_I = \frac{I_{1п}}{I_{1н}}$, пускового моменту $k_M = \frac{M_n}{M_n}$, критичного моменту $\lambda = \frac{M_{к}}{M_n}$, інколи – типові природні характеристики.

Для двигунів з фазним ротором вказується ЕРС на розімкнених кільцях загальмованого ротора $E_{2н}$ при $U_{1н}$ та номінальний струм ротора $I_{2н}$.

Приведених в каталозі даних недостатньо для визначення по них параметрів схеми заміщення та користуватися нею при всіх розрахунках, але по каталожним даним можна побудувати природну електромеханічну та механічну характеристики, скориставшись декількома опорними точками (рис.11.6).

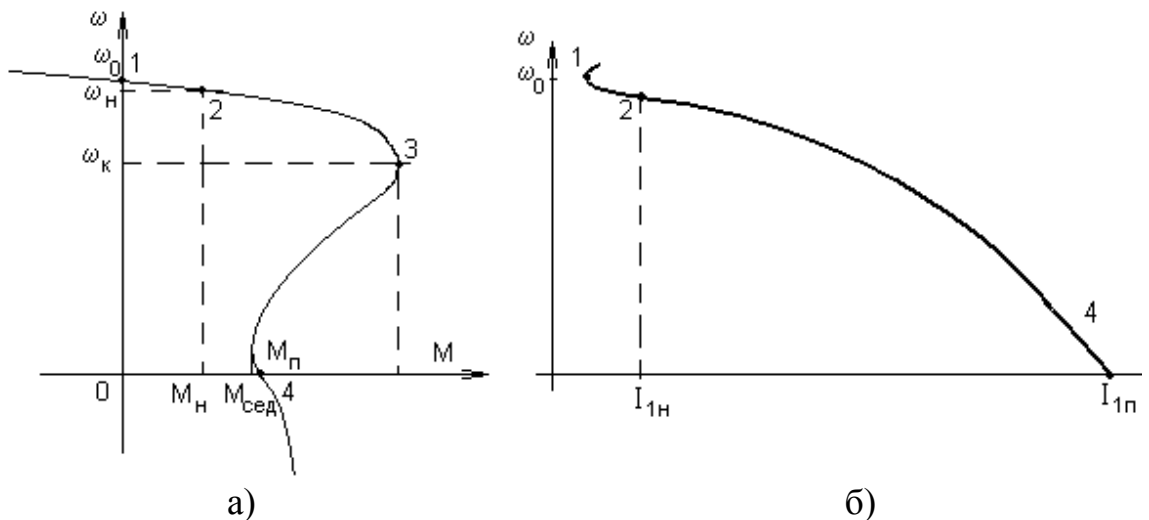


Рис.11.6. До побудови природних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Точка 1 ($\omega = \omega_0$, $M = 0$, $I_1 = I_{xx} \approx 0,35 \cdot I_{1н}$) вибирається з ряду

$n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$ об/хв., як ближча більша до n_n , $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$.

Точка 2 – номінальна. Для визначення **точки 3** ($\omega = \omega_k$, $M = M_k$)

потрібно розрахувати номінальний момент $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$, визначити критичний момент $M_k = \lambda \cdot M_n$ та вирахувати s_k за (11.10) або (11.10,a),

підставивши в ці рівняння M_n та $s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$. **Точка 4** ($\omega = 0$, $M = M_n$, $I_1 = I_{1n}$) розраховується безпосередньо по каталожних даних.

Сучасні двигуни з короткозамкненим ротором проектують так, щоб мати підвищений пусковий момент M_n , і в деяких каталогах вказують так званий «сідловий» момент $M_{сід}$ (рис.11.6,a).

Деяке представлення про характеристики сучасних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можна отримати з наступних даних:

– $s_n = 0,01 - 0,05$ (менші значення у двигунів більшої потужності – сотні кВт);

– $k_I = 5 - 7$;

– $k_M = 1,3 - 1,6$;

– $\lambda = 1,8 - 3,0$.

Як випливає з цих даних, природні властивості асинхронних двигунів досить несприятливі: малий пусковий момент, великий пусковий струм, обмежені можливості керування координатами.