

## ЕЛЕКТРОПРИВОДИ ЗМІННОГО СТРУМУ

### 4.1. Прості моделі асинхронного електропривода

Принцип дії асинхронної машини в самому загальному випадку полягає в наступному: один з елементів машини (статор) використовується для створення магнітного поля, що рухається з певною швидкістю, а в замкнених пасивних контурах іншого елемента (ротора) – наводиться ЕРС, що викликає протікання струмів і утворення сил (моментів) внаслідок їхньої взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному (асинхронному) русі ротора відносно поля, що і надало машинам такого типу назву – асинхронні.

Статор зазвичай виконаний у вигляді декількох розташованих у пазах котушок, а ротор – у вигляді “білячої клітки” (короткозамкнений ротор) або у вигляді декількох котушок (фазний ротор), які з’єднані між собою і виведені на кільця, що розташовані на валу та за допомогою щіток, які ковзають по кільцях можуть бути замкнені на зовнішні резистори.

Незважаючи на простоту фізичних явищ і матеріалізацію їх конструктивів повний математичний опис процесів в асинхронній машині досить складний:

по-перше, всі напруги, струми, потокозчеплення – це змінні величини, які характеризуються частотою, амплітудою, фазою або векторними параметрами;

по-друге, взаємодіють контури, що рухаються, взаємне розташування яких змінюється у просторі;

по-третє, магнітний потік нелінійно пов’язаний зі струмом намагнічування (проявляється насичення магнітного кола), а активні опори роторного кола залежать від частоти (ефект витиснення струму) при цьому опори всіх кіл залежать від температури тощо.

У загальному випадку для машини, що має  $p$  пар полюсів ( $p = 1, 2, 3, \dots$ ), синхронна кутова швидкість  $\omega_0$ , рад/с і обертання магнітного поля, визначиться як

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}; \quad (4.1)$$

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

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (4.2)$$

т.ч. при живленні від мережі  $f_1=50$ Гц синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/хв залежно від конструкції машини.

Вирази (4.1) і (4.2) мають принциповий характер: вони показують, що для

даної машини є лише одна можливість змінювати швидкість обертання магнітного поля – змінювати частоту джерела живлення  $f_1$ .

**Процеси при  $\omega = \omega_0$**

Нехай ротор обертається зі швидкістю  $\omega = \omega_0$ , тобто його обмотки не перетинають силових ліній магнітного поля, і він не робить істотного впливу на процеси.

У досить грубому, але іноді корисному наближенні можна представити обмотку фази статора як деяку ідеальну котушку, до якої прикладена змінна напруга  $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$ .

Змінні, що змінюються синусоїдально, позначаються малими літерами, їхні діючі значення – великими літерами, а векторні величини – великими літерами із крапкою нагорі.

Очевидно, що прикладена напруга  $U_1$  врівноважується ЕРС самоіндукції  $E_1$  (рис. 4.1,а,б)

$$E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{OB} , \quad (4.3)$$

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

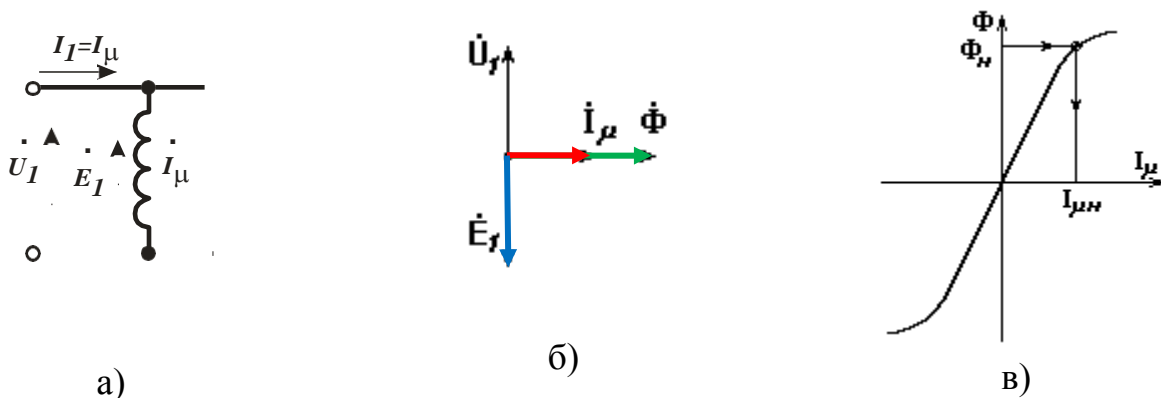


Рис. 4.1. Ідеалізована модель асинхронної машини при  $\omega = \omega_0$  (а), векторна діаграма (б) і крива намагнічування (в)

Можна приблизно вважати, що магнітний потік визначається прикладеною напругою, частотою та параметрами обмотки:

$$\Phi = \frac{U_1}{4,44 f_1 w_1 k_{OB}} \equiv \frac{U_1}{f_1} . \quad (4.4)$$

Струм в обмотці (фазі) статора як струм намагнічування визначиться при цьому лише магнітним потоком і характеристикою намагнічування машини (рис. 4.1,в):

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

У серійних машинах при  $U_1 = U_{1H}$  і  $f_1 = f_{1H}$ , при номінальному магнітному потоці, струм холостого ходу  $I_{10}$  становить зазвичай 30-40% від номінального струму статора  $I_{1H}$ .

### Процеси під навантаженням

При навантаженні валу  $\omega \neq \omega_0$ ; відмінність швидкостей  $\omega$  та  $\omega_0$  прийнято характеризувати ковзанням

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (4.5)$$

Тепер у роторному колі з'явиться ЕРС  $E'_2$ , яка наведена за законом електромагнітної індукції

$$E'_2 = E_1 s. \quad (4.6)$$

Штрихом позначаються наведені величини ротора до статора та враховують неоднаковість обмоток статора та ротора. Частота наведеної в роторних обмотках ЕРС становить

$$f_2 = f_1 s. \quad (4.7)$$

Струм  $I'_2$  у роторному колі, що має опір  $R'_2$  і індуктивність  $L'_2$ , можна розрахувати за формулою

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(R'_2)^2 + (2\pi f_2 L'_2)^2}},$$

або після простих перетворень

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_2'^2}}, \quad (4.8)$$

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

Отримане рівняння відповідає традиційній схемі заміщення фази асинхронного двигуна (рис. 4.2), у якій враховані також параметри статора  $R_1$  та  $X_1$ . Ця проста модель придатна для аналізу сталих режимів при симетричному живленні із симетричним живленням.

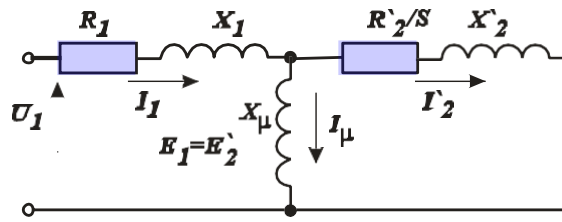


Рис. 4.2. Схема заміщення фази асинхронного двигуна

#### 4.2. Механічні характеристики. Енергетичні режими

Для отримання механічної характеристики можна винести контур намагнічування на затискачі (рис. 4.3,а), як це часто робиться в курсі електричних машин.

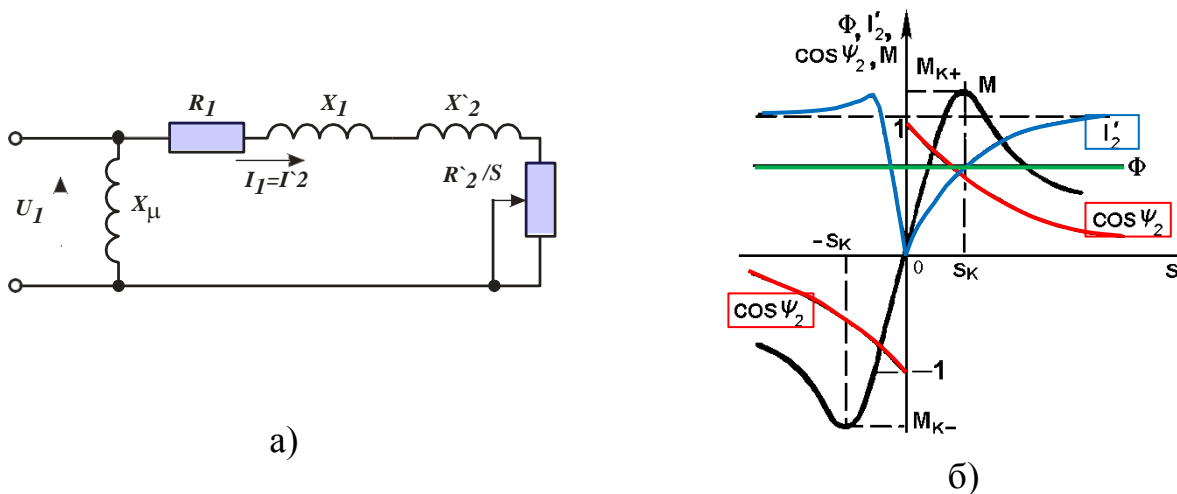


Рис. 4.3. Спрощена схема заміщення (а) і характеристики асинхронної машини (б)

Електромагнітний момент асинхронної машини можна представити формулою

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

де  $I_{2A}$  – активна складова струму ротора,  
 $\psi_2$  – кут між векторами  $E_2$  та  $I_2$ .

Якісне уявлення властивостей механічних характеристик  $M(s)$  можна отримати за залежністю кожного із трьох співмножників від  $s$ .

Магнітний потік  $\Phi$  у першому наближенні відповідно до (4.4) не залежить від  $s$  (рис. 4.4,б). Струм ротора відповідно до формули (4.8) дорівнює нулю при  $s = 0$  та асимптотично прагне до  $\frac{U_1}{X'_2}$  при  $s \rightarrow \pm\infty$  (рис. 4.4,б).

Останній співмножник легко визначити за схемою заміщення:

$$\cos \psi_2 = \frac{\frac{R'_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2)^2}};$$

Значення  $\cos \psi_2$  близько до  $\pm 1$  за малих  $s$  і асимптотично прагне до нуля при  $s \rightarrow \pm \infty$ .

Момент, як добуток трьох співмножників, дорівнює нулю при  $s=0$ , а  $\omega = \omega_0$  (ідеальний холостий хід), досягає позитивного  $M_{K+}$  та негативного  $M_{K-}$  максимумів (критичних значень) при критичних значеннях ковзання  $\pm s_K$ , а потім при  $s \rightarrow \pm \infty$  прагне до нуля за рахунок третього співмножника.

Рівняння механічної характеристики можна отримати, порівнявши втрати в роторному колі, які виражені через механічні та електричні величини. Потужність, спожита з мережі, якщо не враховувати втрати на  $R_1$ , приблизно дорівнює електромагнітній потужності:

$$P_1 \approx P_{EM} = M \omega_0,$$

а потужність на валу визначається як

$$P_2 = M \omega.$$

Втрати в роторному колі складуть

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \approx M \omega_0 - M \omega = M \omega_0 s = P_1 s. \quad (4.9)$$

Ці ж втрати через електричні величини

$$\Delta P_2 = 3(I'_2)^2 R'_2,$$

звідки

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}.$$

Після підстановки  $I'_2$  з (4.8), визначення екстремуму функції  $M(s)$  та відповідних їйому значень  $M_K$  і  $s_K$ , можна отримати:

$$M = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K}, \quad (4.10)$$

де  $a = \frac{R_1}{R_2}$ ;

$$M_K = \frac{3U^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}; \quad (4.11)$$

$$s_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (4.12)$$

На практиці іноді вважають, що  $a = 0$ , тобто не враховують активний опір обмоток статора. Це зазвичай не призводить до істотних погрешностей при  $P_H > 5$  кВт, однак може невиправдано погіршити модель при малих потужностях. При  $a = 0$  формули (4.10) - (4.12) мають вигляд:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} = \frac{2M_K \cdot s \cdot s_K}{s^2 + s_K^2}; \quad (4.10,a)$$

$$M_K = \frac{3U^2}{2\omega_0 X_K}; \quad (4.11,a)$$

$$s_K = \frac{R_2'}{X_K}, \quad (4.12,a)$$

де  $X_K = X_1 + X_2'$  – індуктивний опір розсіювання машини.

При  $s \ll s_K$  можна не враховувати перший член у знаменнику рівняння (4.10,a) та отримати механічну характеристику на робочій ділянці у вигляді

$$M \approx \frac{2M_K s}{s_K}. \quad (4.13)$$

Із рис. 4.3,б і рівнянь (4.10) і (4.10,a) виходить, що жорсткість механічної характеристики асинхронних двигунів змінна. На робочій ділянці  $\beta < 0$ , а при  $|s| > |s_K|$   $\beta > 0$ .

Асинхронний електропривод як і електропривод постійного струму, може працювати в рушійному і трьох гальмівних режимах з таким же, як в електроприводі постійного струму розподілом потоків енергії (рис. 4.4.)

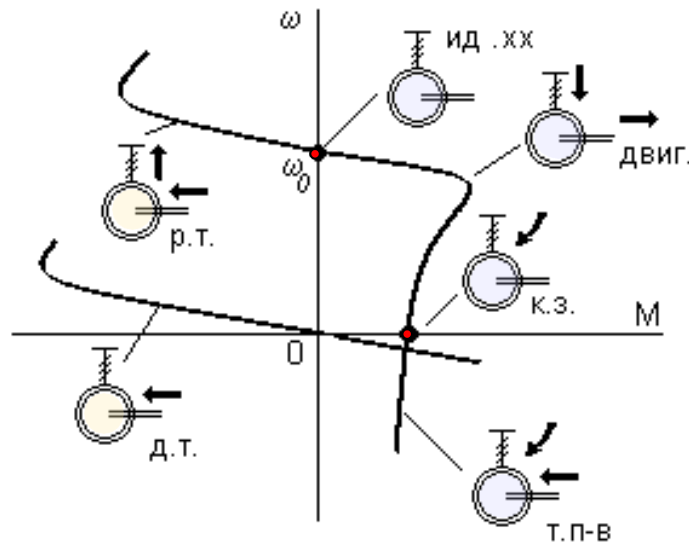


Рис. 4.4. Енергетичні режими асинхронного електропривода

Рекуперативне гальмування здійснюється при обертанні двигуна активним моментом зі швидкістю більшою за  $\omega_0$ . Цей же режим буде мати місце, якщо при обертанні ротора зі швидкістю  $\omega$  зменшити швидкість обертання поля  $\omega_0$ . Роль активного моменту тут буде виконувати момент інерційних мас обертового ротора. Для здійснення гальмування противмиканням необхідно при включеному двигуні змінити місцями дві будь-які фази статора (рис. 4.5). При цьому міняється напрямок обертання магнітного поля і машина гальмується в режимі противмиканням, а потім може реверсуватись (змінити напрямок обертання).

Специфічним є режим динамічного гальмування, що представляє собою генераторний режим відключеного від мережі змінного струму асинхронного двигуна, до статора якого підведений постійний струм. Цей режим застосовується у випадку, якщо після відключення двигуна від мережі потрібна швидка зупинка без реверса.

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

При суперпозиції полів статора та ротора утворюється результуюче поле, за взаємодії якого зі струмом ротора виникає гальмівний момент. Енергія, що надходить із валу двигуна, розсіюється в опорах роторного кола.

У режимі динамічного гальмування поле статора нерухоме, а ковзання визначається як



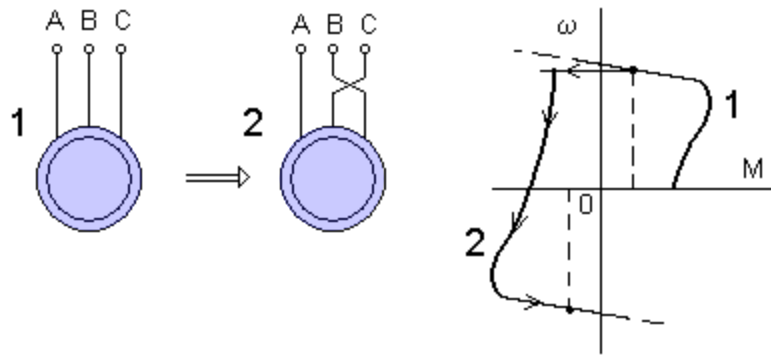


Рис. 4.5. Реверс асинхронного двигуна

$$s_D = \frac{\omega}{\omega_0} .$$

При цьому можна користуватися співвідношеннями для механічної характеристики за аналогією (4.10,a) - (4.12,a):

$$M = \frac{2M_{K,Д}}{\frac{s_D}{s_{K,Д}} + \frac{s_{K,Д}}{s_D}} , \quad (4.14)$$

$$M_{K,Д} = \frac{3I_C^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0(X_{\mu} + X_2')} , \quad (4.15)$$

де  $I_C$  – еквівалентний струм статорних обмоток трифазного режиму, що створює у двигуні такий же магнітний потік, як і постійний струм  $I_{II}$ , що подається в статор при динамічному гальмуванні.

Якщо постійний струм подається через дві фази обмоток статора, то незалежно від схеми з'єднання обмоток (трикутник або зірка) еквівалентний струм можна розрахувати за формулою

$$I_C = 0,816 \cdot I_{II} .$$

А величину постійного струму вибрати за рекомендацією [1] у функції паспортної величини – струму статора на холостому ході  $I_{1,XX}$ :

$$I_{II} = 3 \cdot I_{1,XX}$$

$$s_{K,Д} = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2} \quad (4.16)$$

При ненасиченій машині  $X_\mu \ll X'_2$  та критичному ковзанні в режимі динамічного гальмування  $s_{K,Д}$  істотно менше  $s_K$ . Крім того, струм ротора впливає на величину струму намагнічування. Тому форми кривих механічних характеристик у режимі двигуна і при динамічному гальмуванні відрізняються.

Характеристику в режимі динамічного гальмування можна розрахувати з урахуванням нелінійного намагнічування або залежності ЕРС двигуна від струму намагнічування:

$$E(x) \approx \frac{E_{2H}}{\sqrt{3}} \cdot k_E \cdot x \cdot (-0,02 \cdot x^3 + 0,224 \cdot x^2 - 0,92 \cdot x + 1,72),$$

де  $E_{2H}$  – номінальне значення ЕРС ротора за паспортом;

$k_E$  – коефіцієнт трансформації напруги за паспортом;

$x = \frac{I_\mu}{I_{C,XX}}$  – відносне значення струму намагнічування.

При відомих значеннях  $I_C$ ,  $R'_2$ ,  $X'_2$  і залежності  $E(x)$  можлива така послідовність:

1. Задається ряд значень  $I_\mu$ .

Розраховуються ряд відносних значень  $x$ .

Розраховується відповідний ряд значень  $E(x)$ .

Розраховується ряд значень реактивного опору контуру намагнічування:

$$x_\mu = \frac{E(x)}{I_\mu}.$$

Розраховується ряд значень ковзання:

$$s_{Д} = R'_2 \sqrt{\frac{\left(\frac{I}{I_\mu}\right)^2 - 1}{(x'_2 + x_\mu)^2 - \left(\frac{I}{I_\mu}\right)^2 \cdot (x'_2)^2}}.$$

Розраховується ряд значень струму ротора:

$$I_2' = \frac{I_\mu \cdot x_\mu \cdot s_D}{\sqrt{R_2'^2 + x_2'^2 \cdot s_D^2}}.$$

Розраховується ряд значень моменту двигуна:

$$M = \frac{-\Delta P_2}{\Delta \omega} = \frac{-3 \cdot I_2'^2 \cdot R'}{\omega_0 \cdot s_D}.$$

Розраховується ряд значень швидкості обертання:

$$\omega = \omega_0 \cdot s_D.$$

За відповідним значенням  $M$  і  $\omega$  будується графік характеристики.

### 4.3. Номінальні дані

На шильдику або в паспорті асинхронного двигуна зазвичай зазначені номінальні лінійні напруги при з'єднанні обмоток у зірку та трикутник  $U_{1\lambda} \Big|_{U_{1\Delta}}$ , струми  $I_{1\lambda} \Big|_{I_{1\Delta}}$ , частота  $f_H$ , потужність на валу  $P_H$ , частота обертання  $n_H$ , ККД  $\eta_H$ ,  $\cos \varphi_H$ .

Для двигунів з короткозамкненим ротором у каталозі наводяться кратності пускового струмів  $k_I = \frac{I_{1\Pi}}{I_{1H}}$ , пускового моменту  $k_M = \frac{M_{\Pi}}{M_H}$ , критичного моменту  $\lambda = \frac{M_K}{M_H}$ , іноді типові природні характеристики.

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

Вказаних у каталозі даних недостатньо, щоб визначити за ними параметри схеми заміщення та користуватися нею при всіх розрахунках, однак за каталожними даними можна побудувати природну електромеханічну та механічну характеристики, скориставшись декількома опорними точками (рис. 4.6).

Точка **1** ( $\omega = \omega_0; M = 0; I_1 = I_{1,xx} \approx 0,35I_1$ ) вийде з ряду  $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$  об/хв як найближча більша до  $n_H$ ;  $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$ .

Точка **2** – номінальний режим ( $\omega = \omega_H; M = M_H$ );  $\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}$ .

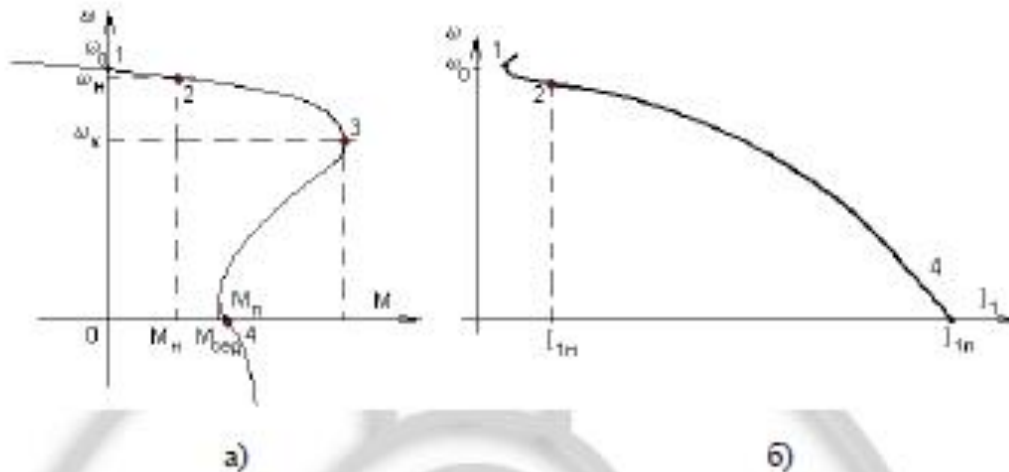


Рис. 4.6. До побудови природних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Точка 3 ( $\omega = \omega_K, M = M_K$ ). Для її визначення потрібно розрахувати  $M_H = \frac{P_H [BT]}{\omega_H [c^{-1}]}$ , визначити  $M_K = \lambda M_H$  та обчислити  $s_K$  за (4.12) або (4.12,а), підставивши в ці рівняння  $M_H$  і  $s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}$ .

Точка 4 ( $\omega = 0, M = M_{II}, I_1 = I_{1,II}$ ) розраховується безпосередньо за каталожними даними.

Сучасні двигуни з короткозамкненим ротором проектують так, аби мати підвищений пусковий момент  $M_{II}$ .

У деяких каталогах указують так званий "сідловий" момент  $M_{сш}$  (рис. 4.6,а).

Деяке уявлення про характеристики сучасних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можливо отримати з наступних даних:

$s_H = 0,01 - 0,05$  (менші значення у двигунів більшої потужності);  $k_I = 5 - 7$ ;  $k_M = 1,3 - 1,6$ ;  $\lambda = 1,8 - 3,0$ .

Із цих даних бачимо, що природні властивості асинхронних двигунів досить несприятливі: малий пусковий момент, великий пусковий струм і найголовніше – обмежені можливості керування координатами.

## ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Конструктивні особливості та принцип роботи асинхронного двигуна.
2. Можливі методи керування швидкістю електропривода змінного струму.
3. Процеси в АД при  $\omega = \omega_0$ .
4. Процеси в АД під навантаженням.
5. Побудова схеми заміщення фази асинхронного двигуна.
6. Механічні характеристики АД.
7. Можливі режими роботи АД (проілюструвати за допомогою графіків механічних характеристик).
8. Схемне рішення та графіки механічних характеристик для режиму реверсу АД.
9. Реалізація та розрахунок режиму динамічного гальмування АД.
10. Номінальні дані АД та їх аналіз.