

Лекція №13. Гальмівні режими асинхронного двигуна.

13.1. Загальні положення.

Асинхронний двигун може працювати у всіх трьох гальмівних режимах:

- а) з рекуперацією енергії в мережу;
- б) в режимі противовключення;
- в) в режимі динамічного гальмування.

При відсутності зовнішнього статичного моменту на валу двигун, підключений до мережі, буде обертатися зі швидкістю, близькою до синхронної, споживаючи з мережі енергію, необхідну для покриття втрат в сталі і обмотках. Якщо за рахунок зовнішньої сили ротор обертається із синхронною швидкістю, то мережа буде покривати тільки втрати в статорі, а механічні та в стали будуть покриватися зовнішньою силою.

У двигунному режимі, коли $\omega < \omega_0$, що обертається магнітне поле перетинає провідники обмоток статора і ротора в однаковому напрямку, ЕРС статора E_1 і ротора E_2 збігаються по фазі.

При $\omega = \omega_0$ ЕРС в роторі не наводиться, тому що його провідники не перетинаються магнітним полем.

При $\omega > \omega_0$ провідники ротора будуть перетинатися в протилежному напрямку, а статора – в попередньому напрямі. ЕРС ротора E_2 змінює свій знак на зворотний і машина переходить у генераторний режим з рекуперацією енергії в мережу. Що стосується струму, то змінює свій напрямок тільки його активна складова, а реактивна складова при від'ємному ковзанні зберігає свій напрямок. Це видно і з виразу для струму ротора:

$$I_2 = \frac{E_2' \cdot S}{r_2' + j \cdot x_2' \cdot S} = \frac{E_2 \cdot S \cdot r_2'}{r_2'^2 + (x_2' \cdot S)^2} - j \cdot \frac{E_2' \cdot x_2' \cdot S^2}{r_2'^2 + (x_2' \cdot S)^2}$$

Такі ж висновки можна зробити і на основі аналізу активної і реактивної потужностей. Дійсно

$$P_a = P_{\text{ЭМ}} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{S} = \frac{m_1 \cdot U_1'^2 \cdot \frac{r_2'}{S}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_K^2} = \frac{m_1 \cdot U_1'^2 \cdot r_2' \cdot S}{(r_1 \cdot S + r_2')^2 + (x_K \cdot S)^2}$$

Тобто активна потужність змінює напрямок (віддається в мережу), а з виразу для реактивної потужності Q_2 випливає, що при $S < 0$ реактивна потужність вторинного контуру Q_2 зберігає свій знак незалежно від режиму роботи машини.

$$Q_2 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_2' \cdot \sin \psi_2 = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_{K^2}}} \cdot \frac{x_K}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_{K^2}}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot x_K \cdot S^2}{(r_1 \cdot S + r_2')^2 + (x_K \cdot S)^2}$$

Це означає, що АД як у двигунному, так і в генераторному режимі споживає реактивну потужність, необхідну для створення обертового магнітного поля.

Гальмування з віддачею енергії в мережу використовується в підйомно-транспортних установках, при спуску важких вантажів. Під дією вантажу ротор машини буде обертатися зі швидкістю $\omega > \omega_0$, вона переходить в генераторний режим і створює гальмівний момент. При рівності $M = M_c$ вантаж буде спускатися з усталеною швидкістю ω_c , як показано на рис.13.1,а. Для нормального спуску вантажу M_c не повинен перевищувати $M_{кр}$ в генераторному режимі.

При реактивному M_c короткочасно режим з рекуперацією енергії можна отримати, якщо АД допускає перемикання обмотки статора з однієї пари полюсів на іншу, як показано на рис.13.1, б. Цей режим має місце на ділянці ВС після перемикання числа пар полюсів з $p_n = 1$ на $p_n = 2$.

В режимі противмикання ротор двигуна обертається в напрямку, протилежному дії моменту двигуна. Його ковзання $S > 1$, а частота струму в роторі f_2 більша за частоту f_1 живлячої мережі $f_2 = f_1 \cdot S$. Тому незважаючи на те, що струм ротора у 7-9 разів більший номінального, тобто більший пускового струму, момент унаслідок великої частоти струму, отже, великого індуктивного опору роторного кола ($x_2 \cdot S$), буде невеликий, тобто струм майже чисто індуктивний. Тому для збільшення початкового гальмівного моменту АД з фазовим ротором включають великий додатковий опір.

$$r_{\text{дод}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} \cdot (S_{H_{шт}} - S_H) = r_{2H} \cdot (S_{H_{шт}} - S_H)$$

де E_{20} – номінальна ЕРС ротора при $S=1$;

S_H – номінальне ковзання;

$S_{H_{шт}}$ – ковзання при номінальному навантаженні на штучній характеристиці.

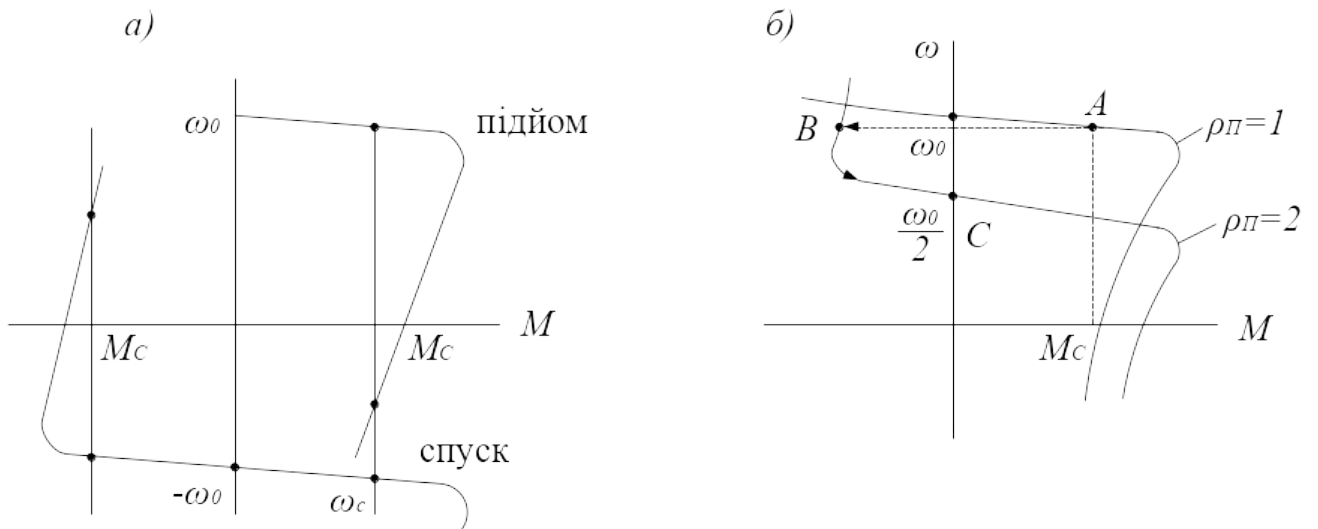


Рис.13.1.

При спуску вантажу в режимі противмикання гальмування протікає на прямолінійній ділянці механічної характеристики, жорсткість якої визначається активним опором роторної ланцюга. Процес переходу АД з двигунного режиму в режим проти вмикання при гальмівному спуску вантажу показаний на рис.13.2,а.

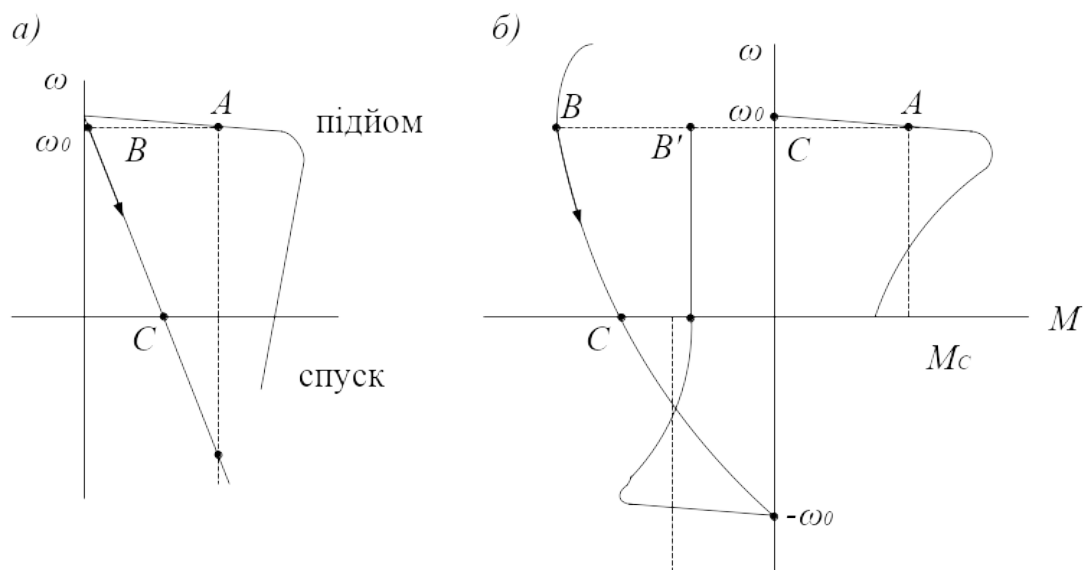


Рис.13.2.

Для переходу АД в режим проти вмикання при реактивному моменті опору необхідно на ходу двигуна змінити порядок чергування фаз живлячої напруги, що призведе до зміни напрямку обертання магнітного поля, і одночасно ввести в коло ротора додатковий опір з метою збільшення початкового гальмівного моменту і зменшення кидка струму. Процес показаний на рис.13.2,б.

Гальмування противмиканням АД при реактивному моменті опору не ефективно, так як початковий гальмівний момент при S близькому до 2, із-за

великого реактивного опору, рівного $x_2 \cdot S$, буде невеликим (відрізок СВ' на рис.13.2,б).

Розглянемо тепер динамічне гальмування АД. При відключенні обмотки статора АД від мережі, зберігається лише незначний магнітний потік від залишкового намагнічування сталі статора. ЕРС, що наводиться цим потоком в обертовому роторі і струм ротора будуть дуже малими. Взаємодія струму ротора з потоком не може створити електромагнітного моменту. Тому для отримання належного гальмівного моменту необхідно штучно створити належний магнітний потік статора. Це може бути досягнуто подачею в обмотки статора постійного струму або підключенням до них конденсаторів, або тиристорного перетворювача частоти, що забезпечує протікання по обмотках статора випереджуючого струму, що створює ефект ємності. В 1-му випадку буде мати місце режим динамічного гальмування з незалежним збудженням, у 2-му – з самозбудженням.

Розглянемо тільки 1-й випадок, оскільки гальмування, відповідне цьому випадку, є основним. При динамічному гальмуванні з незалежним збудженням обмотки статора відключаються від мережі трифазного струму і підключаються до джерела постійного струму. Цей струм створює нерухомий у просторі магнітний потік, який при обертанні ротора наводить в останньому ЕРС.

13.2. Симетричне включення.

Симетричне включення 3-х обмоток статора в мережу постійного струму неможливо без їх перемикань. Тому використовується одна із схем, наведених на рис.13.3.

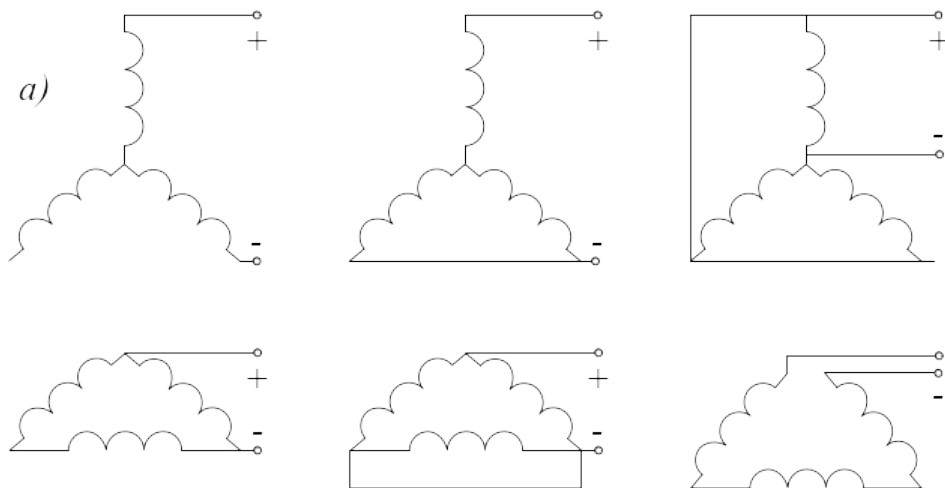


Рис.13.3.

Оскільки при живленні постійним струмом обмотки мають тільки провідникові, для отримання потрібного значення струму досить невеликого за величиною напруги. Як джерело постійного струму для двигунів невеликої

та середньої потужності використовуються напівпровідникові випрямлячі, а для великих двигунів можуть використовуватися спеціальні генератори постійного струму низької напруги.

Для виведення рівняння механічної характеристики АД в режимі динамічного гальмування режим синхронного генератора, в який перетворюється АД після підключення до джерела постійного струму, доцільно замінити еквівалентним режимом АД, вважаючи, що його статор замість постійного живиться змінним струмом. При такій заміні МРС створюється спільно обмотками статора і ротора і має бути дотримана рівність МРС для обох випадків, тобто $F_{\text{пост}} = F_{\text{зм}}$. Визначити МРС, створювану постійним струмом, для схеми «а» рис.13.3 можна з векторної діаграми рис.13.4, в якій вектор МРС обмоток статора розташовується так, як розташовані обмотки статора, по яких протікає постійний струм $I_{\text{п}}$.

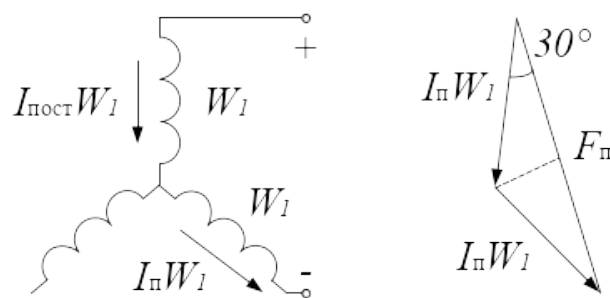


Рис.13.4.

$$F_{\text{пост}} = 2 \cdot I_{\text{пост}} \cdot W_1 \cdot \cos 30^\circ = \frac{2 \cdot I_{\text{п}} \cdot W_1 \cdot \sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{п}} \cdot W_1$$

Амплітуда МРС, створюваної змінним струмом I_1 при протіканні його по обмоткам статора

$$F_{\text{зм}} = \frac{3}{2} I_{1M} \cdot W_1 = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1M} \cdot W_1$$

Прирівнюючи $F_{\text{пост}}$ і $F_{\text{зм}}$, отримаємо значення змінного струму, еквівалентного постійному

$$\sqrt{3} \cdot I_{\text{п}} \cdot W_1 = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot W_1 ; \quad I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\text{п}} , \quad I_{\text{п}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_1$$

Необхідні напруги і потужність постійного струму

$$U = I_{\text{п}} \cdot 2r_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_1 \cdot 2r_1 ; \quad P = I_{\text{п}}^2 \cdot 2r_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_1 \right)^2 \cdot 2r_1 = 3 I_1^2 \cdot r_1$$

Визначивши струм I_1 , машину в гальмівному режимі можна уявити як нормальний АД. Однак його робота в режимі динамічного гальмування істотно відрізняється від роботи в нормальному двигунному режимі, в якому намагнічувальний струм і магнітний потік при зміні ковзання практично не змінюються. При динамічному гальмуванні магнітний потік при зміні ковзання змінюється внаслідок безперервної зміни результуючої МРС, що складається з незмінною МРС статора (постійного струму) і змінної МРС ротора (змінного струму змінної частоти).

Результуючий намагнічувальний струм, приведений до числа витків обмотки статора

$$I_{\mu} = \frac{I_1 \cdot W_1 + I_2' \cdot W_2}{W_1}$$

З векторної діаграми струмів (рис.13.5) слідує:

$$I_1 \cdot \cos \psi_1 = I_2' \cdot \cos \psi_2$$

$$I_1 \cdot \sin \psi_1 = I_{\mu} + I_2' \cdot \sin \psi_2$$

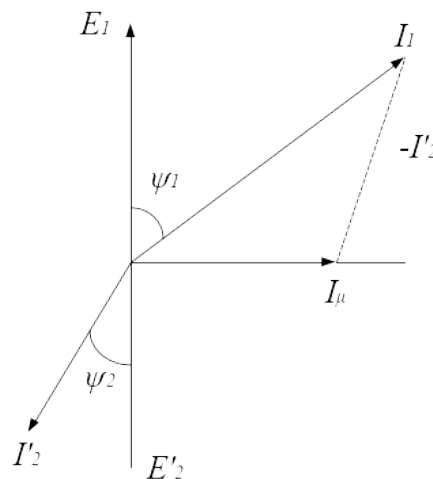


Рис.13.5.

Звівши в квадрат, праві і ліві точки цих рівнянь і почленно складаючи, отримаємо:

$$I_{1,2}^2 = I_{2,2}'^2 + I_{\mu,2}^2 + 2 I_{\mu} \cdot I_{2,2}' \cdot \sin \psi_2$$

$$I_{\mu} = \frac{E_1}{x_{\mu}}$$

Намагнічувальний струм дорівнює

У приведеній машині $E_1 = E_2'$, де E_2' - ЕРС ротора при синхронній швидкості ω_0 , що відповідає частоті мережі. При ω , відмінній від ω_0 , ЕРС

ротора дорівнюватиме $E_2' \cdot \frac{\omega}{\omega_0} = E_2' \cdot v$, де v - відносна швидкість або ковзання в режимі динамічного гальмування.

При цьому рівняння рівноваги ЕРС для роторного кола має вигляд $E_2' \cdot v = I_2' \cdot Z_2'$, а намагнічувальний струм, виражений через E_2' :

$$I_\mu = \frac{E_1}{x_\mu} = \frac{E_2'}{x_\mu} = \frac{I_2' \cdot Z_2'}{x_\mu \cdot v}$$

Опір ротора з урахуванням того, що x_2' змінюється зі зміною швидкості обертання ротора дорівнює

$$Z_2' = \sqrt{r_2'^2 + (x_2' \cdot v)^2}$$

З огляду на те, що $\sin \psi_2 = \frac{x_2' \cdot v}{Z_2'}$ і підставляючи значення Z_2' , I_μ , $\sin \psi_2$ в рівняння для струму I_1^2 , знаходимо

$$I_2' = \frac{I_1 \cdot x_\mu \cdot v}{\sqrt{r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 \cdot v^2}}$$

Електромагнітний момент

$$M = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{v}}{\omega_0} = \frac{m_1 \cdot I_1^2 \cdot x_\mu^2 \cdot r_2' \cdot v}{\omega_0 \cdot [r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 \cdot v^2]}$$

де m_1 - число фаз статора.

З цього виразу видно, що момент при динамічному гальмуванні визначається змінним струмом I_1 , еквівалентним постійному, що протікає по обмотках статора.

Взявши похідну $\frac{dM}{dv}$ і прирівнявши її до нуля, знайдемо, що момент буде максимальний при критичній відносній швидкості $v_k = \frac{r_2'}{x_2' + x_\mu}$, а значення цього моменту, який також називають критичним, так само:

$$M_k = \frac{m_1 \cdot I_1^2 \cdot x_\mu^2}{2 \omega_0 \cdot (x_\mu + x_2')}$$

Звідси видно, що $M_{кр}$ в режимі динамічного гальмування не залежить від активного опору кола ротора.

Сімейство механічних характеристик, що відповідають різним значенням постійного струму і різному опорам роторному колі зображено на рис.13.6.

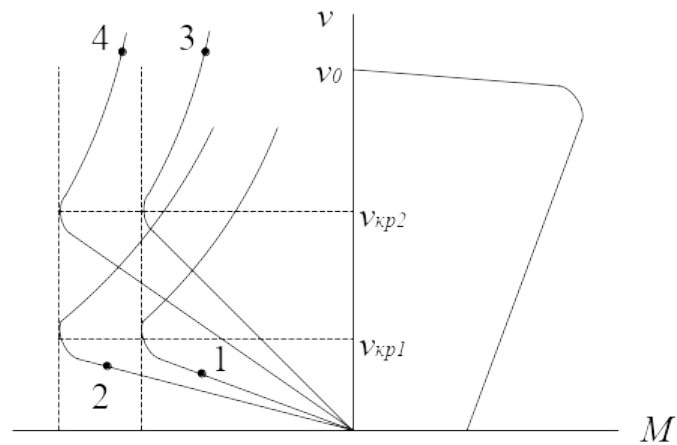


Рис.13.6.

Криві 1 і 2 відповідають однаковому значенню опору кола ротора і різним значенням постійного струму в статорі, а криві 3 і 4 – тим самим значенням постійного струму, але з більшим опором кола ротора.

Розділивши значення M на значення $M_{кр}$, рівняння механічної характеристики можна представити у вигляді:

$$M = \frac{2 M_K}{\frac{v}{v_K} + \frac{v_K}{v}}$$