

## Лекція №32. Втрати енергії при перехідних процесах в регульованому електроприводі і способи зменшення втрат енергії.

### 32.1. Загальні положення.

При живленні двигуна від керованого перетворювача  $\omega_0$  не змінюється стрибком, як і в розглянутих вище випадках, а плавно шляхом поступового зміни напруги в разі ДПС, або частоти в разі АД. При цьому різниця між  $\omega_0$ , заданої перетворювачем і швидкістю, що купується якорем або ротором виявляється меншою, ніж при стрибкоподібній зміні  $\omega_0$ . У межах, коли  $M_c=0$  і задає швидкість  $\omega_0$  змінюється повільно, то швидкість ротора або якоря встигає повністю слідувати за нею. Енергія, споживана з мережі, в цьому випадку повністю витрачається на збільшення запасу кінетичної енергії ротора або якоря, тобто на здійснення корисної роботи. Втрати енергії повністю відсутні.

Розглянемо як залежать втрати при пуску в системі КП-Д від темпу лінійного наростання ЕРС перетворювача, а значить і  $\omega_0$  двигуна.

При розгляді перехідних процесів у разі, коли  $\omega_0$  змінюється в часі за лінійним законом, були отримані вирази для швидкості і моменту двигуна для етапу його розгону з нерухомого стану.

$$\omega = \varepsilon_0 t - T_M \cdot \varepsilon_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}), \quad M = M_c + \beta \cdot T_M \cdot \varepsilon_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}).$$

При пуску вхолосту, тобто при  $M_c=0$ , вираз для моменту приймає вигляд:

$$M = \beta \cdot T_M \cdot \varepsilon_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}).$$

Втрати енергії в якірному колі ДПС або роторного кола АД на всьому інтервалі пуску

$$\Delta A_{\text{ПО}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} M (\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} M \omega_0 \cdot S dt.$$

При  $t_{\text{пп}}=t_{\text{п}}$  і допускаючи для спрощення лінійну залежність  $\omega=f(t)$ , отримаємо

$$\omega = \varepsilon_0 t - T_M \cdot \varepsilon_0; \quad M = \beta \cdot T_M \cdot \varepsilon_0 = I_{\Sigma} \varepsilon_0; \quad \omega_0 = \varepsilon_0 t = \varepsilon_0 t_{\text{п}}.$$

$$\omega_0 - \omega = \varepsilon_0 t - \varepsilon_0 t - T_M \cdot \varepsilon_0; \quad \frac{d\omega}{dt} = \varepsilon_0; \quad dt = \frac{d\omega}{\varepsilon_0}, \quad \varepsilon_0 = \frac{\omega_0}{t_{\text{п}}}.$$

Тоді

$$\Delta A_{\text{mn}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} J_{\Sigma} \varepsilon_0 \cdot T_M \cdot \varepsilon_0 dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} J_{\Sigma} \varepsilon_0^2 \cdot T_M \cdot \frac{d\omega}{\varepsilon_0} = J_{\Sigma} \varepsilon_0 \cdot T_M \int_0^{\omega_0} d\omega = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{2T_M}{t_{\text{п}}}$$

Звідси випливає, що у разі  $t_{\text{п}} \gg T_M$  втрати енергії при пуску з лінійною зміною напруги значно менші, ніж при пуску з постійною напругою, коли  $\omega_0$  задається стрибком.

У системі Г-Д, в якій керування двигуном здійснюється зміною струму в обмотці збудження, а пуск двигуна – включенням її на повну напругу, ЕРС генератора змінюється за експоненціальним законом. Струм в якорному колі в перехідних процесах при  $M_c=0$  визначається виразом:

$$i_{Я} = k \cdot I_{кз} \left( e^{\frac{t}{T_{\epsilon}}} - e^{\frac{t}{T_M}} \right) \cdot \frac{T_M}{T_{\epsilon} - T_M} = k \cdot I_{кз} \cdot \frac{1}{m-1} \left( e^{\frac{t}{T_{\epsilon}}} - e^{\frac{t}{T_M}} \right),$$

де  $m = \frac{T_{\epsilon}}{T_M}$ .

Коефіцієнт  $k=1$  для пуску,  $k= -1$  для режиму гальмування і  $-2$  – для реверсу.

$T_{\epsilon}$  – електромагнітна постійна кола збудження генератора;  $T_M$  – електромеханічна постійна приводу.

Втрати енергії в якорному колі при  $M_c=0$

$$\Delta A_{nn} = \int_0^{t_{\text{пп}}} i_{Я}^2 (R_{Я0} + R_{Я2}) dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} \left[ k \cdot I_{кз} \cdot \frac{1}{m-1} \left( e^{\frac{t}{T_{\epsilon}}} - e^{\frac{t}{T_M}} \right) \right]^2 \cdot (R_{Я0} + R_{Я2}) dt$$

Після інтегрування і перетворень отримаємо при  $t_{\text{пп}} = \infty$

$$\Delta A_{nn} = k^2 \cdot I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{m+1}.$$

Чим більше  $T_{\epsilon}$  в порівнянні з  $T_M$ , тобто чим повільніше наростає ЕРС генератора, тим менше втрати енергії. Вони зменшуються в порівнянні з відповідними втратами в перехідних процесах двигуна при стрибкоподібній зміні напруги на якорі. Зменшується і споживання енергії та з урахуванням енергії, витраченої на зміну запасу кінетичної енергії  $A_k$  інерційних мас, становить при  $M_c = 0$ :

при пуску:  $A_{no} = A_k - \Delta A_{nno} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{m-2}{m+1}$ ;

при гальмуванні:  $A_{TO} = A_k - \Delta A_{TO} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{m}{m+1}$ ;

при реверсі:  $A_{PO} = A_k - \Delta A_{PO} = 4I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{m+1}$ .

У перехідних процесах під навантаженням

$$\Delta A_{nn} = \int_0^{t_{\text{пп}}} (I_c + I_{\text{дин}})^2 (R_{Я0} + R_{Я2}) dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} I_c^2 \cdot (R_{Я0} + R_{Я2}) dt + \int_0^{t_{\text{пп}}} I_{\text{дин}}^2 (R_{Я0} + R_{Я2}) dt + 2I_c (R_{Я0} + R_{Я2}) \int_0^{t_{\text{пп}}} I_{\text{дин}} dt,$$

де  $\int_0^{t_{\text{пп}}} I_{\text{дин}} dt = \cdot I_{кз} \frac{1}{m-1} \int_0^{t_{\text{пп}}} \left( e^{\frac{t}{T_0}} - e^{\frac{t}{T_M}} \right) dt$ .

Зокрема, під час пуску під навантаженням

$$\Delta A_{nn} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \frac{1}{m+1} + P_c \left( 2T_m + \frac{\Delta\omega_c t_{II}}{\omega_0} \right),$$

де  $P_c$  - потужність, споживана двигуном з мережі;  $\Delta\omega_c$  - перепад швидкості, обумовленої статичному навантаженні  $M_c$  при сталій ЕРС генератора.

При рекуперативному гальмуванні

$$\Delta A_{PT} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \frac{1}{m+1} - P_c \left( 2T_m + \frac{\Delta\omega_c t_T}{\omega_0} \right).$$

### 32.2. Втрати в регульованому електроприводі.

При визначенні втрат в регульованому асинхронному електроприводі при плавній зміні частоти  $f$ , яке живить напруги, отже,  $\omega_0$ , вважаємо, що к.з. АД в перехідному режимі працює на лінійній ділянці механічної характеристики, тобто при  $S_{абс} < S_{кр.абс}$ . Зокрема, під час пуску вхолосту ( $M_c = 0$ ), коли заданий час розгону

$$t_{II0} = \frac{\omega_{он}^2}{\varepsilon_0} \gg T_m; S_a = I_{\Sigma} \cdot \varepsilon; \quad \Delta A_{III} = I_{\Sigma} \frac{\omega_{он}^2}{\varepsilon_0} \left( 1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) \cdot \frac{2T_m}{t_{но}}.$$

Звідси видно, що при порівняно повільному заданні  $\omega_0$  при частотному пуску АД, так, щоб  $t_{II0} \gg T_m$  втрат енергії можуть бути істотно зменшені в порівнянні з втратами при прямому пуску. Для електроприводів, у яких перехідні процеси займають чимало часу в робочому циклі, дуже важливою є проблема зменшення втрат. З раніше отриманого виразу

$$\Delta A_{nn} = J_{\Sigma} \omega_0 \left( \omega_{кон} - \omega_{нач} \right) - J_{\Sigma} \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \left( S_{нач}^2 - S_{кон}^2 \right)$$

впливає, що для зменшення втрат енергії потрібно знизити запас кінетичної енергії електроприводу в сталому режимі. Цього можна досягти зменшенням моменту інерції приводу, застосовуючи, наприклад, двигуни спеціального виконання з подовженим ротором (якорем), але меншого діаметра.

Зменшити втрати енергії можна ступінчастим зміною в перехідному процесі швидкості  $\omega_0$ , шляхом зміни напруги, що підводиться (в разі ДПС). Розглянемо це на найпростішому випадку пуску двухдвигательного електроприводу постійного струму зміною напруги в два ступені шляхом перемикання якорів з послідовного з'єднання на паралельне. Кожен двигун

розрахований на  $U_H$ . При послідовному з'єднанні напруга на якорях  $= \frac{1}{2} U_H$

(див. рис.32.1), отже,  $\omega_0$  кожного двигуна дорівнює половині  $\omega_0$  при  $U_H$ . Двигуни розганяються до половинної швидкості.

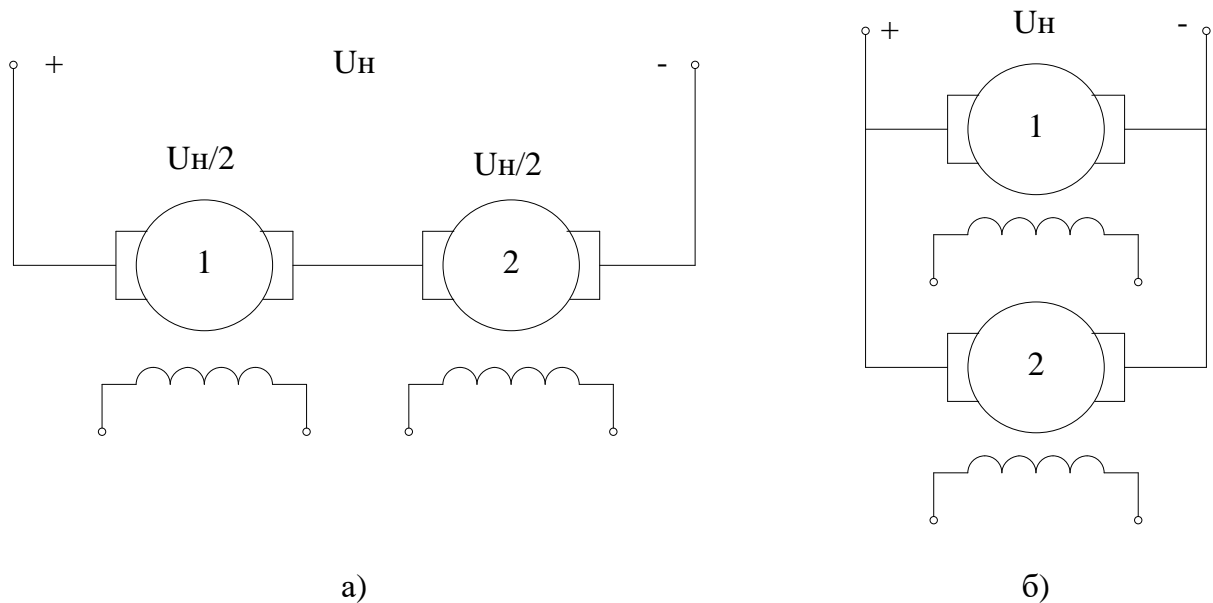


Рис.32.1.

Вважаючи для спрощення  $M_c = 0$ , можна сказати, що втрати в якірного кола кожного з двигунів під час пуску до  $\omega = \frac{\omega_0}{2}$  складають

$$\Delta A'_{no} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{I_{\Sigma} \left( \frac{\omega_0}{2} \right)^2 - 0}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8}.$$

При подальшому розгоні до  $\omega = \omega_0$  шляхом включення двигунів паралельно при  $U = U_H$  (див. рис.32.1,б), втрати будуть рівні

$$\Delta A''_{no} = J_{\Sigma} \frac{\left( \omega_0 - \frac{\omega_0}{2} \right)^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Сумарні втрати будуть в 2 рази менше, ніж при пуску в один щабель.

$$\Delta A_{no} = \Delta A'_{no} + \Delta A''_{no} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8} + J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{4}.$$

Зменшення втрат і витрат енергії при такому пуску і  $M_c = 0$  в два ступені напруги можна проілюструвати за допомогою діаграми, зображеної на рис.32.2.

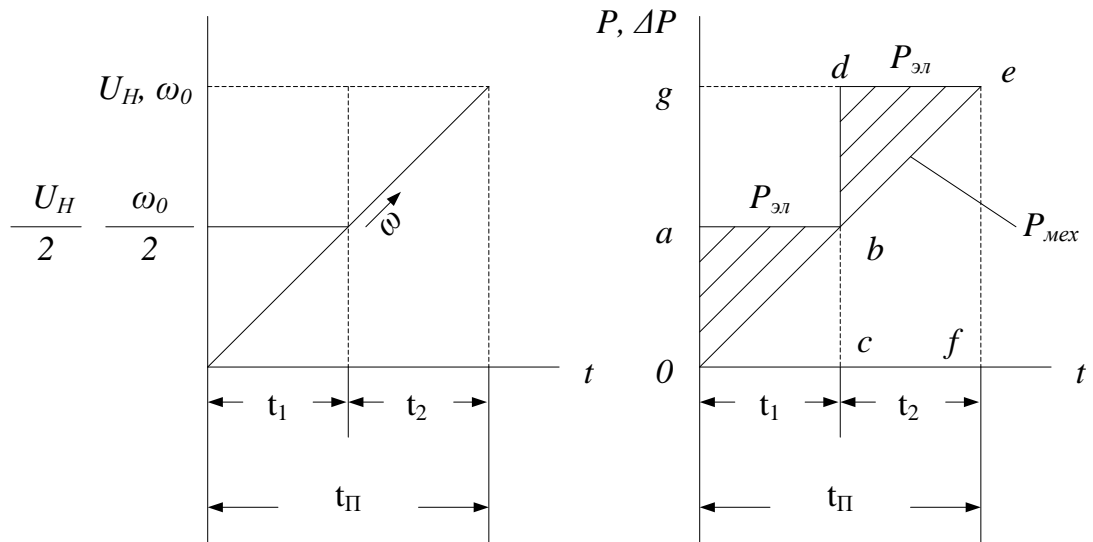


Рис.32.2.

Для кожного з двигунів енергія споживана з мережі на першій ступені напруги визначається площею прямокутника  $oabc$ . Потужність, споживана з мережі, може бути прийнята постійною (якщо  $M_c = \text{const} = 0$ , отже, при  $U = \frac{U_H}{2} = \text{const}$  струм теж буде постійним) і пропорційним ординаті  $oa$ , а потужність на валу ( $P_{\text{мех}}$ ) у міру розгону збільшується пропорційно збільшенню  $\omega$ , тобто за "ab". Втрати енергії на першій ступені визначаються площею  $\Delta oab$ . При включенні двигунів паралельно на повну напругу, потужність, споживана з мережі при тому ж струмі, зростає вдвічі і стає пропорційною ординаті "cd", а механічна потужність  $P_{\text{мех}}$  змінюється за "be". Втрати енергії на другому ступені визначаються площею  $\Delta bde$ . Повні втрати за час пуску дорівнюють сумі площ  $\Delta oab$  і  $\Delta bde$ . Якби пуск був в одну сходинку, то втрати енергії визначалися б площею  $\Delta oge$ . Таким чином, при пуску в два ступені втрати енергії в два рази менші, ніж при пуску в одну сходинку, а споживана енергія становить  $\frac{3}{4}$  від енергії при пуску в одну сходинку (визначається площею  $oabdef$ ). Енергія передана на вал в той же час буде такою ж, як і при пуску в одну сходинку і визначається площею  $\Delta oef$ .

При пуску в "m" ступенів напрузі втрати енергії обернено пропорційні числу ступенів, тобто  $\Delta A_n^m = A_n \cdot \frac{1}{m}$ , якщо ступені напруги однакові, а

$$\text{витрата енергії } \Delta A_n = A_n \cdot \frac{m+1}{2m}.$$

В загальному випадку втрати на i-му ступені

$$\Delta A_i = J_{\Sigma} \frac{\Delta \omega_i^2}{2}, \text{ де } \Delta \omega_i = \omega_{0i} - \omega_{\text{нач},i},$$

а сумарні втрати  $\Delta A = \sum_{i=1}^n J_{\Sigma} \frac{\Delta \omega_i^2}{2}$  на всіх сходинках рівні  $\Delta \omega_i = \frac{\omega_{0m}}{\omega_m}$ , то і

$$\Delta A = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0m}^2}{2m}.$$

У разі застосування багатошвидкісних АД пуск до найбільшої швидкості завжди потрібний з метою зменшення втрат здійснювати ступенями. Інакше вони будуть значно більшими, ніж у такого ж по потужності одношвидкісного двигуна і має синхронну швидкість, що дорівнює максимальній швидкості багатошвидкісного двигуна.

Визначимо, для прикладу, втрати енергії при пуску двохшвидкісного АД в два ступені вхолосту. Розгін на першій ступені йде до швидкості  $\frac{\omega_0}{2}$ ,

а на другому ступені від  $\frac{\omega_0}{2}$  до  $\omega_0$ , де  $\omega_0$  – найбільша синхронна швидкість. Такий пуск аналогічний пуску ДНЗ в два ступені напруги:

Втрати на першій ступені

$$\Delta A_{no(1)} = J_{\Sigma} \frac{\left(\frac{\omega_0}{2}\right)^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2' + r_o'}\right) = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8} \left(1 + \frac{r_1}{r_2' + r_o'}\right).$$

Втрати на другій ступені аналогічні.

Гальмування багатошвидкісних двигунів для зменшення втрат аналогічне пуску і його слід здійснювати також ступенями. При цьому при переході з більшою  $\omega_0$  на меншу здійснюється гальмування з рекуперацією енергії в мережу. Так якщо двошвидкісний АД гальмується при  $M_c=0$  зі

швидкістю  $\omega_{0(2)}$  до  $\omega_{0(1)} = \frac{\omega_{0(2)}}{2}$  швидкості з рекуперацією, а від  $\omega_{0(1)}$  до  $\omega=0$  противмиканням, то втрати на першій ступені будуть

$$\Delta A_{P.T.O} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{4} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right)^{-1} \int_0^1 S dS = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{1}{2^2}.$$

Втрати на другому ступені (гальмування противмиканням)

$$\Delta A_{np.o} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{4} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right)^2 \int_1^2 S dS = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{3}{4}.$$

Повні втрати

$$\Delta A_0 = \Delta A_{P.T.O} + \Delta A_{np.o}$$