

Лекция № 12

# ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

## Закони регулювання при частотному управлінні

Регулювання частоти приведе до зміни потоку, а отже, до зміни характеристик двигунів, що викликає необхідність встановлення законів при частотному регулюванні швидкості:

$$U_1 \approx E_1 = \pi \sqrt{2} \Phi f_1 w_1 k_{об1}$$

Для забезпечення стабільної роботи у всьому діапазоні необхідно отримати  $M_{\max}/M_H = \text{const}$ .

$$M_{\max} = \frac{p m_1 U_1^2}{8 \pi^2 f_1^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})} = \frac{c U_1^2}{f_1^2}$$

Що при зміні частоти  $f_1$  одночасно з частотою обертання змінюється і максимальний момент, тобто перевантажувальна здатність двигуна.

Отже, при частотному регулюванні повинно бути забезпечено виконання умови:

$$\frac{M_{\max 1}}{M_{H1}} = \frac{M_{\max 2}}{M_{H2}} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{M_{\max 1}}{M_{\max 2}} = \frac{M_{H1}}{M_{H2}} = \frac{M_1}{M_2}$$

де індекси “1” і “2” відносяться до різних частот.

На підставі отриманих співвідношень маємо:

$$\frac{M_{\max 1}}{M_{\max 2}} = \left( \frac{U_{11}}{U_{12}} \right)^2 \left( \frac{f_{12}}{f_{11}} \right)^2$$

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{f_{11}}{f_{12}} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad \text{закон Костенко.}$$

Для того, щоб отримати  $K_M = \max$  одночасно із регулюванням частоти напруги живлення  $f_1$  необхідно регулювати напругу  $U_1$  за отриманим законом Костенко.

При цьому потужність двигуна змінюється прямопропорційно його частоті, оскільки  $M = \text{const}$ .

При роботі АД із постійним моментом на валу  $M = \text{const}$  правило частотного керування приймає наступний вигляд:

$$\frac{U_{11}}{f_{11}} = \frac{U_{12}}{f_{12}}$$

Тобто, при зміні частоти необхідно пропорційно їй змінювати напругу. Обмеженням при такому законі є величина прикладеної напруги.

При застосуванні режиму керування із постійною потужністю на валу  $P=\text{const}$ , при якому  $\Omega_1 M_1 = \Omega_2 M_2$  повинно виконуватися наступне співвідношення:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{f_{12}}{f_{11}}, \text{ оскільки } \Omega \sim f$$

Після підстановки в формулу для закону Костенко:

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \sqrt{\frac{f_{11}}{f_{12}}}$$

Практичне використання частотного регулювання АД показало, що закон частотного управління при  $P=\text{const}$  підтверджується приблизно до тих пір, поки режим АД не почне суперечити умовам ідеалізації: насичення магнітного кола не велике, а активний опір первинної обмотки незначною мірою впливає на основний потік. Даний закон застосовується при частотах кратних  $3 \dots 4 n_H$ . При великому діапазоні зміни частоти і моменту треба кожного разу спеціальним аналізом шукати оптимальне співвідношення  $U_1/f_1$  або рівень магнітного потоку.

Булгаков А.А. запропонував вважати оптимальним такий режим, в якому задовольняється умова:

$$\frac{\Phi}{\Phi_H} = \sqrt{\frac{M}{M_H}}$$

При такому управлінні АД знаходиться в оптимальних умовах, має малі втрати і високий ККД. Але прийняте допущення практично не виконується, і до того ж не наголошується, чи реалізується цей режим технічними засобами.

### Системи управління перетворювачем частоти

Як приклад розглянемо широко вживаний на практиці випадок регулювання швидкості АД при постійному моменті на валу  $M = \text{const}$ . Щоб забезпечити цей режим, необхідно підтримувати постійним магнітний потік в двигуні. Як впливає з виразу для електромагнітного моменту:

$$M = C_M \Phi I_2 \cos \phi_2 = \text{const}$$

Для забезпечення  $M = \text{const}$  необхідно забезпечувати постійним магнітний потік  $\Phi$  та добуток  $I_2 \cdot \cos \phi_2$ , добуток цих величин:

$$\frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{\pi \sqrt{2} \Phi f_2 w_2 k_{об2} r_2}{r_2^2 + k f_2^2}$$

Якщо забезпечити  $f_2 = \text{const}$ , то  $I_2 \cdot \cos \phi_2 = \text{const}$ . При виконанні цих умов регулювання забезпечуються близькі до оптимальних умови роботи двигуна у всьому діапазоні частоти обертання. Для підтримки постійності магнітного потоку при постійній частоті струму ротора необхідно забезпечити, щоб струм статора залишався постійним:

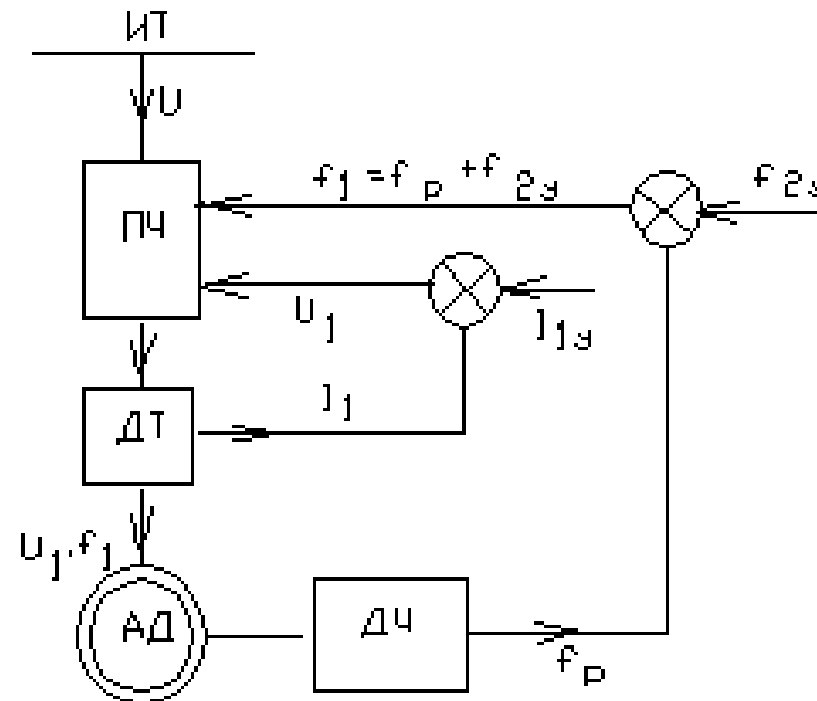
$$I_1 = I_M + (-I_2) = \text{const},$$

При  $\Phi = \text{const}$ ,  $I_m = \text{const}$ , для реалізації цього способу необхідно підтримувати  $I_1 = \text{const}$ .

Щоб отримати  $P_2 = \text{const}$  частоту та напругу ПЧ необхідно регулювати так, щоб в статорі протікав заданий струм  $I_1$ , а струм ротора мав задану частоту  $f_2$ .

Для цього система повинна мати два канали управління, один з яких задає величину  $U_1$  відповідно до виміряного значення струму статора  $I_1$ , а другий – частоту  $f_1$  відповідно до виміряного значення частоти обертання ротора  $n$ .

Покажемо функціональну схему системи управління АД:



ИТ – джерело живлення;

ДТ – датчик струму;

ДЧ – датчик частоти.

$I_{1y}$  та  $f_{2y}$  пропорційні необхідним величинам  $I_1$  та  $f_2$ . При зростанні частоти важко реалізувати такий закон і використовується перехід при підвищених частотах на  $P_2 = \text{const}$ .

### **Особливості теорії асинхронних двигунів при частотному регулюванні**

Теорія частотного регулювання АД з короткозамкнутим ротором аналогічна загальній теорії асинхронних машин, що живляться від мережі нескінченної потужності, коли  $U_1 = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$ .

Розглянемо деякі особливості при живленні АД від ПЧ.

**Перша особливість** частотно-регульованих машин – пряма пропорційність всіх індуктивних опорів частоті напруги живлення. Введемо в розгляд відносну частоту струму статора  $\alpha = f_1 / f_{1H}$ .

Тоді індуктивні опори представлено в наступному вигляді:

$$x_{f1} = 2\pi f_1 L_{\sigma 1} = 2\pi \alpha f_{1H} L_{\sigma 1} = \alpha \cdot x_{\sigma 1} \quad x'_{\sigma 2} = \alpha \cdot x'_{\sigma 2} \quad x_{fM} = \alpha \cdot x_M$$

В такому випадку всі індуктивні опори відповідають одній частоті.

Основні рівняння АМ із врахуванням прийнятих позначень при змінній частоті:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + j\alpha x_{\sigma 1})\dot{I}_1$$

$$\dot{E}_2' = \left( \frac{r_2'}{s} + j\alpha x_{\sigma 2}' \right) \dot{I}_2'$$

$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_{Ma} + \dot{I}_{Mr}$$

Дану систему можливо перетворити, якщо розділити на коефіцієнт  $\alpha$ :

$$\frac{\dot{U}_1}{\alpha} = -\frac{\dot{E}_1}{\alpha} + \left( \frac{r_1}{\alpha} + jx_{\sigma 1} \right) \dot{I}_1$$

$$\frac{\dot{E}_2'}{\alpha} = \left( \frac{r_2'}{\beta} + jx_{\sigma 2}' \right) \dot{I}_2'$$

$$\beta = \alpha \cdot s = \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_2}{f_{1H}}$$

$\beta$  – відносна частота вторинного струму або показник частоти.

За даними рівняннями можливо побудувати векторну діаграму.



**Друга особливість** – зміна енергетичних показників залежно від закону управління. При постійному моменті  $M = \text{const}$  магнітні втрати і електричні втрати незмінні, зростають лише механічні страти, тобто енергетичні показники залишаються на високому рівні (без врахування додаткових втрат).

При постійній потужності на валу  $P_2 = \text{const}$  і при зміні частоти  $f_1$  в певному діапазоні напруга  $U_1$  змінюється в меншому діапазоні. З точки зору енергетичних показників, відповідно до співвідношення  $U_1 \approx E_1 = \pi \sqrt{2} \Phi f_1 w_1 k_{об1}$  при зменшенні частоти  $f_1$  росте магнітний потік, що викликає також зростання первинного струму. В результаті зростають магнітні і електричні втрати, і всі основні енергетичні показники двигуна погіршуються, особливо при  $f_1 \leq f_{1н}/2$ . Тому застосування вказаного закону в області низьких частот недоцільно. У діапазоні вгору від номінальної частоти забезпечується робота практично з номінальним ККД, оскільки при збільшенні частоти відбувається зменшення магнітного потоку. Але максимальний момент  $M_{\text{max}} \sim U_1^2 / f_1^2$  при збільшенні частоти зменшується.

У всіх випадках доводиться обмежувати збільшення напруги, оскільки це приводить до зростання встановленої потужності перетворювача.

**Третя особливість** – збільшення додаткових втрат. Додаткові втрати в обмотках і в сталі магнітопроводу виникають від дії вищих гармонік струму і магнітного потоку, створених вищими гармоніками напруги живлення.

Проведеними дослідженнями встановлено, що вищі гармоніки напруги впливають на енергетичні показники таким чином.

- ККД зменшується в середньому на 2...3%, а коефіцієнт потужності – до 5%;
- Збільшення додаткових втрат приводить до зростання нагріву двигуна і знижує в результаті цього величину корисної потужності на валу. Відношення потужності двигунів при живленні від ПЧ до їх потужності при роботі від мережі складає:

1.Для двигунів серії 4А – 0,8...0,85;

2.Для частотно-регульованих двигунів, виконаних на магнітопроводах серії 4А, – 0,9...0,95;

3.Для частотно-регульованих двигунів із спеціальними магнітопроводами – 0,95...1,0.

**Четверта особливість** – можливість здійснення частотного пуску в хід. Тому не приймаються заходи для посилення ефекту витіснення струму при проектуванні частотно-регульованих двигунів, і значення пускового і мінімального моментів не задають.