

## Лекція №3. Механічні характеристики електроприводів. Усталені режими.

### 3.1. Жорсткість механічної характеристики

Жорсткість механічної характеристики електроприводу – це відношення різниці моментів, що розвиваються електродвигунні пристроєм, до відповідної різниці кутових швидкостей електроприводу, тобто

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega = dM / d\omega.$$

Зазвичай на робочих ділянках механічні характеристики двигунів мають негативну жорсткість  $\beta < 0$ , тобто зі збільшенням моменту швидкість зменшується. Поняття жорсткості може бути застосовано і до механічних характеристиках виробничих механізмів. Ці характеристики можна оцінювати жорсткістю

$$\beta_c = dM_c / d\omega.$$

Роботі електричного двигуна і виробничого механізму в сталому режимі відповідає рівновагу моменту опору механізму і крутного моменту двигуна при певній швидкості, тобто  $M = M_c$ . Зміна моменту опору на валу двигуна призводить до того, що швидкість двигуна і момент, який він розвиває, можуть автоматично змінюватися і привід продовжуватиме стійко працювати при іншій швидкості з новим значенням моменту.

Для відновлення рівноваги між зміненим моментом опору і моментом двигуна у всіх неелектричних двигунах потрібна участь спеціальних регуляторів, які впливають на джерело енергії, збільшуючи або відповідно зменшуючи подачу води, палива або пара. В двигунах роль автоматичного регулятора може виконувати ЕРС двигуна. Ця особливість електродвигунів автоматично підтримувати рівновагу системи при змінному моменті опору є дуже цінною властивістю, так як у багатьох випадках момент може змінюватися в тій чи іншій мірі. Привід статично стійкий, якщо в точці сталого режиму виконується умова

$$dM / d\omega - dM_c / d\omega = \beta - \beta_c < 0. \quad (3.1)$$

Умова означає, що привід статично стійкий, якщо при додатньому збільшенні кутової швидкості момент двигуна виявиться менше статичного моменту (моменту опору) і привід внаслідок цього загальмується до попереднього значення швидкості. При від'ємному збільшенні кутової швидкості момент двигуна виявиться більше моменту опору і привід внаслідок цього розженеться до попереднього значення швидкості. Привід статично нестійкий, якщо в точці сталого режиму умова (3.1) не виконується.

Зазвичай при проектуванні електроприводу механічна характеристика виробничого механізму є вже заданою. Тому для одержання стійкої роботи в сталому режимі для певних швидкостей і моментів опору виробничих механізмів необхідно підбирати механічну характеристику електродвигуна відповідної форми. Це може бути досягнуто підбором відповідного типу електродвигуна і зміною електричних параметрів його кіл.

### 3.2. Рівняння руху електропривода

Вище були розглянуті умови роботи електропривода в сталому режимі, коли момент, що розвивається двигуном, дорівнює моменту опору механізму і швидкість приводу є постійною. Однак у багатьох випадках привід прискорюється або сповільнюється, і тоді виникає інерційна сила або інерційний момент, що двигун повинен долати, перебуваючи в перехідному режимі. Таким чином, перехідним режимом електропривода називають режим роботи при переході від одного усталеного стану до іншого, коли змінюються швидкість, момент і струм.

Причинами виникнення перехідних режимів в електроприводах є або зміна навантаження, пов'язане з виробничим процесом, який вплив на електропривод при управлінні ним, тобто пуск, гальмування, реверс і т.п. Перехідні режими в електроприводах можуть виникнути також внаслідок аварій або порушення нормальних умов електропостачання (наприклад, зміни напруги або частоти мережі тощо).

Рівняння руху електропривода має враховувати всі сили і моменти, що діють в перехідних режимах.

При поступальному русі рушійна сила  $F$  завжди врівноважується силою опору машини  $F_c$  та інерційною силою  $F_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt}$ , що виникає при змінах швидкості.

Відповідно до викладеного рівняння рівноваги сил при поступальному русі записується так:

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt}. \quad (3.2)$$

Аналогічно рівняння рівноваги моментів для обертального руху (рівняння руху приводу) має наступний вигляд:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) показує, що розвиваючий двигуном обертаючий момент  $M$  врівноважується моментом опору на його валу  $M_c$  та інерційним або динамічним моментом  $M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$ . В (3.2) і (3.3) прийнято, що маса тіла і відповідно момент інерції приводу є постійними, що справедливо для значного числа виробничих механізмів. З аналізу (3.3) видно:

- 1) при  $M > M_c$   $d\omega/dt > 0 > 0$ , тобто має місце прискорення приводу;
- 2) при  $M < M_c$   $d\omega/dt < 0 < 0$ , тобто має місце уповільнення приводу (очевидно, що уповільнення приводу може бути і при від'ємному значенні моменту двигуна);
- 3) при  $M = M_c$   $d\omega/dt = 0 = 0$ , в даному випадку привід працює в сталому режимі.

Обертаючий момент, що розвивається двигуном при роботі, прийнято вважати додатнім, якщо він спрямований у бік руху приводу. Якщо він спрямований у бік, протилежний рухові, то він вважається від'ємним.

Рівняння руху дозволяє проводити аналіз відповідності залежностей швидкості  $\omega = f(t)$  і моменту двигуна  $M = f(t)$  в реальних осцилограмах. Покажемо це на конкретних прикладах.

На рис.3.1 наведена осцилограма пуску електропривода при активному моменті опору (підйом вантажу). Для аналізу весь процес пуску розбиваємо на 4 етапи.

Перший етап  $0 \div t_1$ . На цьому етапі момент двигуна зростає від 0 до  $M_c$ , динамічний момент  $M_{дин} = M - M_c < 0$  внаслідок чого прискорення приводу  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ , а привід під дією активного моменту опору (під дією вантажу) розганяється у зворотний бік. При  $t = t_1$   $M_{дин} = M - M_c = 0$  прискорення  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  в кривій швидкості настає перелом (дотична до кривої швидкості паралельна осі часу).

Другий етап  $t_1 \div t_2$ . На цьому етапі момент двигуна від  $M_c$  збільшується до максимального  $M_{мак}$ , що забезпечує зростання прискорення від 0 до максимального  $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{мак}$  (нахил дотичних кривої швидкості до осі часу збільшується).

Третій етап  $t_2 \div t_3$ . На цьому етапі момент двигуна  $M = M_{мак} = const$ , прискорення  $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{мак} = const$  (швидкість змінюється за лінійним законом).

Четвертий етап  $t_3 \div t_4$ . На цьому етапі момент двигуна зменшується від  $M_{мак}$  до  $M_c$ , прискорення  $(\frac{d\omega}{dt})_{мак}$  знижується від до нуля.

Вище викладеної підтверджується побудованої залежністю.

$$M_{дин} = M - M_c \equiv \frac{d\omega}{dt} = f(t).$$

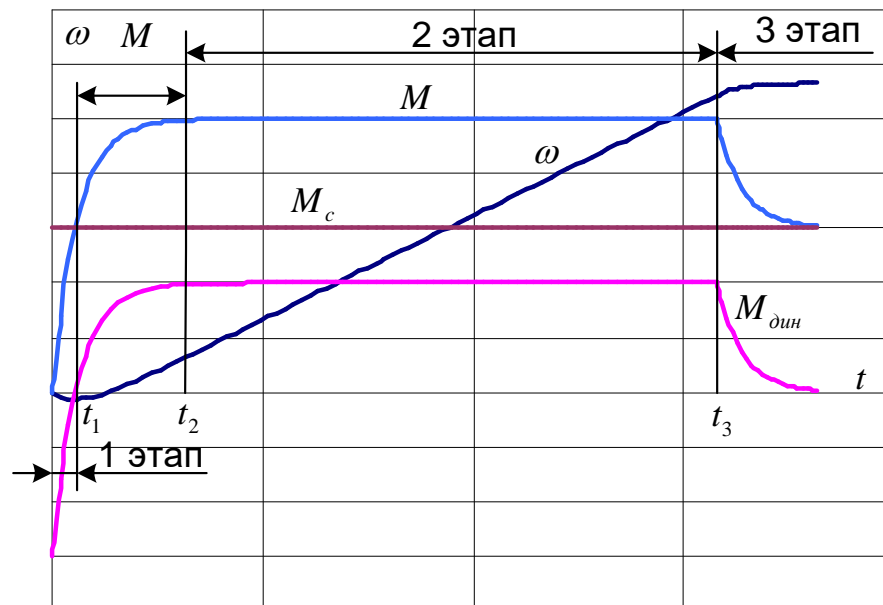


Рис.3.1. Осцилограма пуску електропривода при активному моменті опору.

На рис.3.2 наведена осцилограма пуску електроприводу при реактивному моменті опору. Основною відмінністю від попереднього випадку є 1 етап. На цьому етапі  $M < M_c$  швидкість приводу  $\omega = 0$ .

На рис.3.3 наведена осцилограма реверсу електроприводу. Для аналізу весь процес пуску розбиваємо на 4 етапи.

Перший етап  $0 \div t_1$ . На цьому етапі момент двигуна змінюється від  $M_c$  до  $M_{m,мак}$ , динамічний момент  $M_{дин} = M - M_c < 0$  внаслідок чого прискорення приводу  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  і привід гальмується під дією моменту опору і гальмівного двигуна. При  $t = t_1$  момент двигуна досягає значення  $M_{m,мак}$ , що забезпечує зростання прискорення від 0 до максимального  $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{мак}$ .

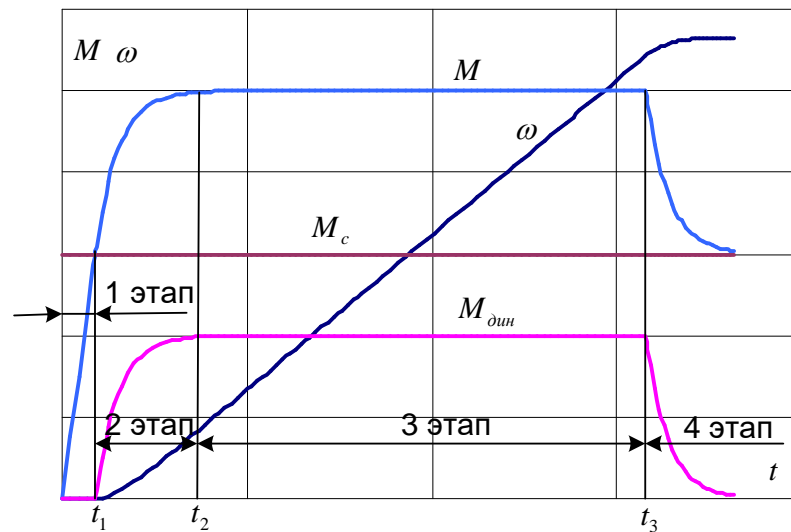


Рис.3.2. Осцилограма пуску електроприводу при реактивному моменті опору.

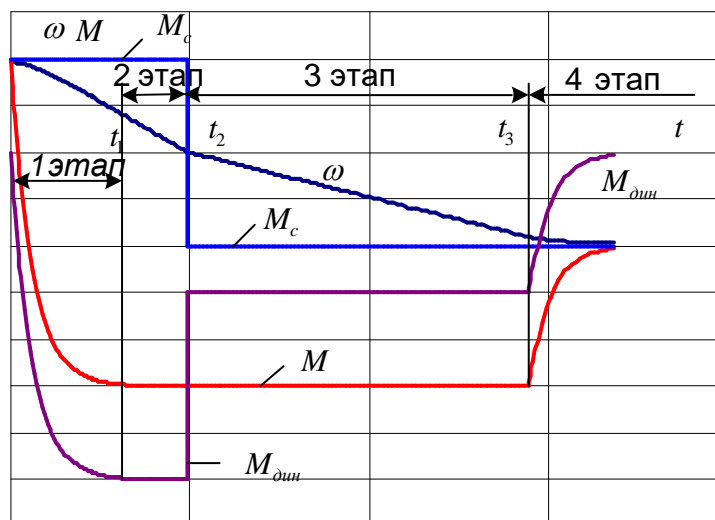


Рис.3.3. Осцилограма реверсу.

На 2 етапі момент двигуна  $M = M_{m,мак} = const$ , динамічний момент  $M_{дин} = M_{m,мак} - M_c = -( |M_{m,мак}| + M_c )$ , прискорення  $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{m,мак} = const$ , швидкість зменшується за лінійним законом до нуля. При  $t = t_2$  швидкість  $\omega = 0$ , момент опору  $M_c$  змінює свій знак.

На 3 етапі момент двигуна  $M = M_{раз,мак} = M_{m,мак} = const$ , динамічний момент  $M_{дин} = M_{раз,мак} + M_c = -( |M_{раз,мак}| - M_c )$ , прискорення  $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{раз,мак} = const$ , швидкість збільшується за лінійним законом в зворотну сторону. Динамічний момент по абсолютній величині на 3 етапі в порівнянні з 2 зменшується, а значить і прискорення по абсолютній величині на цьому етапі менше.

На 4 етапі момент двигуна по абсолютній величині зменшується від  $M_{мак}$  до  $M_c$ , прискорення знижується від до нуля. Вище викладене підтверджується побудованою залежністю.

$$M_{дин} = M - M_c \equiv \frac{d\omega}{dt} = f(t).$$

На рис.3.4 наведено осцилограма ударного прикладання навантаження. Характер перехідного процесу коливальний.

Відповідність кривих перепаду швидкості  $\Delta\omega = f(t)$  і моменту двигуна  $M = f(t)$  наочно характеризуються такими характерними точками.

При  $t = t_1, t = t_3$ , момент двигуна досягає значення моменту опору  $M_c$ , а це значить  $M_{дин} = M - M_c = 0$  прискорення  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  в кривій швидкості настає перелом (дотична до кривої швидкості паралельна осі часу).

При  $t = t_2$ , момент двигуна досягає максимального значення, а це значить, що динамічний момент  $M_{дин} = M - M_c$  і прискорення  $\frac{d\omega}{dt}$  максимальні.

При  $t = t_4$ , момент двигуна досягає мінімального значення, а це значить, що динамічний момент  $M_{дин} = M - M_c < 0$  абсолютній величині на цьому етапі максимальний і прискорення (уповільнення)  $\frac{d\omega}{dt}$  також максимальне.

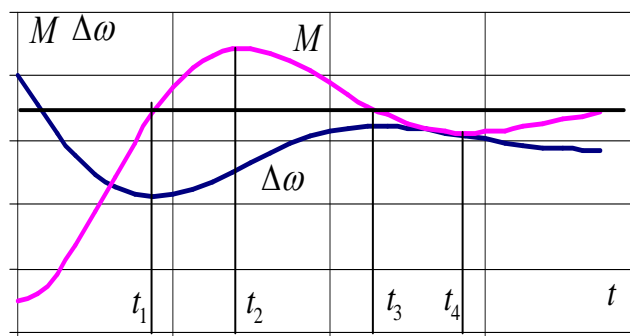


Рис.3.4. Осцилограма ударного прикладання навантаження.

### 3.3. Час прискорення і уповільнення приводу

Визначення часу перехідних процесів засноване на інтегруванні рівняння руху приводу. Розділяючи перемінні, отримуємо

$$dt = J \frac{d\omega}{M - M_c}.$$

Час, необхідний для зміни швидкості приводу від  $\omega_1$  до  $\omega_2$ :

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M - M_c} d\omega. \quad (3.4)$$

Для розв'язку цього інтеграла необхідно знати залежності моментів двигуна і механізму від швидкості. У найпростішому випадку, прийнявши  $M = const$ , і  $J = const$ , отримаємо:

$$t_{1,2} = J(\omega_2 - \omega_1)/(M - M_c).$$

Цим рівнянням можна скористатися, наприклад, для розрахунку часу пуску приводу. Якщо значення моменту двигуна під час пуску позначити через  $M_n$ , то отримаємо такий вираз для часу пуску від стану спокою до кінцевої швидкості  $\omega_{ном}$ , відповідної заданому моменту опору

$$t_n = J\omega_{ном}/(M_n - M_c).$$

Якщо потрібно точно врахувати час перехідного процесу і момент двигуна не може бути прийнятий постійним, наприклад при пуску двигуна з короткозамкненим ротором, необхідно користуватися (3.4).

З (3.4) видно, що теоретично повне час перехідного процесу дорівнює нескінченності. Дійсно, оскільки перехідний процес закінчується при настанні рівності моментів ( $M = M_c$ ), то величина, що стоїть під знаком інтеграла, прямує до нескінченності. У розрахунках зазвичай вважають, що процес розгону закінчується при швидкості  $\omega = 0,95\omega_2$ , тоді час пуску отримає кінцеве значення.

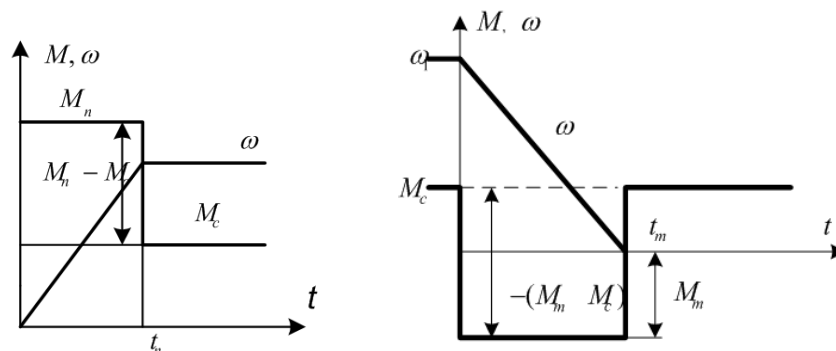


Рис.3.5. Графіки пуску і гальмування приводу.

У тих випадках, коли динамічний момент має від'ємне значення, привід сповільнюється. Як зазначалося вище, для такого випадку рівняння моментів матиме вигляд

$$M - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} < 0.$$

Момент двигуна може бути як негативним, так і позитивним. При позитивному моменті він повинен бути менше моменту опору  $M < M_c$ . З останнього рівняння випливає, що час гальмування

$$t_m = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J d\omega}{(M - M_c)} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{J d\omega}{-(M - M_c)}.$$

Приймаючи як частковий випадок  $J = \text{const}$ ,  $M = \text{const}$ ,  $M_c = \text{const}$ , отримаємо:

$$t_m = J \frac{\omega_1 - \omega_2}{-(M - M_c)}.$$

Користуючись рівнянням (2.19), можна розрахувати час гальмування ( $\omega_2 = 0$ ) для графіка моменту, показаного на рис. 2.10.

Якщо момент двигуна і момент статичний знаходяться в складній залежності від швидкості, рівняння руху вирішується чисельними методами.