

Лекція №10. Номінальний режим роботи електроприводів.

10.1. Допустимі значення координат.

Розглянемо визначення допустимих значень основних координат – струму, моменту, швидкості.

В основі всіх цих оцінок лежать **номінальні дані двигуна**, які вказуються, як правило, на заводській емблемі або в паспорті двигуна.

До таких даних для двигунів, які призначені для роботи в тривалому режимі, відносяться: номінальна напруга U_n , В; струм I_n , А; потужність на валу P_n , кВт; частота обертання n_n , об/хв. ($\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$, 1/с); ККД η_n ; напруга збудження $U_{зб}$, В; струм збудження $I_{зб}$, А (для двигунів з незалежним збудженням); момент інерції J_n , $кг \cdot м^2$, виконання двигуна IP . Інші відомості, як правило, в паспорті не приводяться.

Номінальні дані відповідають одній точці в площині $\omega - M$ з допустимими та прийнятними значеннями всіх основних величин в тривалому режимі, хоча в дійсності електропривод працює в будь-яких точках і зовсім не при номінальних даних.

Номінальні дані використовуються для побудови основних (природних) характеристик двигуна, які служать основою для отримання штучних характеристик під час регулювання координат.

В електроприводах з двигунами з незалежним збудженням всі механічні та електромеханічні характеристики – прямі лінії і для їх побудови достатньо двох точок, наприклад, точки ідеального холостого ходу ($M = 0, \omega = \omega_0$) і номінального режиму ($M = M_n, \omega = \omega_n$). Дві із вказаних координат (M_n та ω_0)

) повинні бути визначені по номінальним даним, причому $\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_n}$ і

$M_n = k\Phi_n I_n$, тобто потрібно знати величину $k\Phi_n$. Для її визначення зручно скористуватися рівнянням з номінальними величинами, звідки отримаємо:

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}, \quad (10.1)$$

тут невідомим є опір якірного кола $R_{я}$ – обмотки якоря, щіткового контакту, додаткових обмоток, якщо вони використовуються.

Краще всього мати надійну оцінку $R_{я}$, але часто це пов'язано з труднощами. Тоді використовують грубу (іноді дуже грубу) оцінку, яка отримана з припущення, що половина номінальних втрат ΔP_n – це втрати в міді обмотки:

$$0,5 \cdot \Delta P_n \approx I_n^2 \cdot R_{я},$$

звідки

$$R_{я} \approx \frac{0,5 \cdot \Delta P_n}{I_n^2} = 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_n). \quad (10.2)$$

Номинальний електромагнітний момент M_n , визначений як $M_n = k\Phi_n I_n$, більший за номінальний момент на валу:

$$M_{n, \text{вал}} = \frac{P_n}{\omega_n}$$

на величину ΔM .

Природні характеристики двигунів з послідовним збудженням будуються з використанням універсальних характеристик у відносних величинах.

Відносні величини зручні і для двигунів постійного струму з незалежним збудженням.

Якщо прийняти за базові величини U_n , I_n , ω_n , $k\Phi_n = \frac{U_n}{\omega_0}$ та $R_n = \frac{U_n}{I_n}$, то отримаємо:

$$\omega^* = \frac{U^* - I^* R^*}{\Phi^*}$$

та

$$\omega^* = \frac{U^*}{\Phi^*} - \frac{M^* R^*}{(\Phi^*)^2},$$

де всі відносні величини визначені як

$$X^* = \frac{X}{X_0}.$$

Тоді, прийнявши $U^* \equiv \Phi^* = 1$, отримаємо:

$$\omega^* = 1 - I^* R^*,$$

або при $I^* = 1$ (при номінальному струмі):

$$\omega^* = 1 - R^*. \quad (10.3)$$

Останнє співвідношення дозволяє дуже легко будувати характеристику при заданому R або, навпаки, визначати R , якщо характеристика відома.

Відмітимо, що, як правило, відносний опір власне якірного кола дуже невеликий: $R_n^* = 0,02 - 0,05$, і жорсткість природної характеристики ($R = R_n$) досить висока:

$$\beta_{np} = (-50) - (-20).$$

Розглянемо допустимі (безпечні) границі зміни основних координат.

Напруга обмежується номінальним значенням. В реверсивних електроприводах допускається на час реверсу двократне перевищення номінального значення.

Магнітний потік обмежений номінальним значенням, оскільки при його тривалому перевищенні струм збудження, що перевищує номінальний, може викликати недопустимий перегрів обмоток. Короткочасне (до хвилини) двократне збільшення струму збудження, що використовується, наприклад, в електроприводах з живленням якірного кола від джерела струму, допустиме, але внаслідок насичення магнітний потік при цьому збільшується незначно. При форсуваннях – пришвидшеному наростанні магнітного потоку –

допустиме короткочасне 2–3-кратне перевищення номінальної напруги збудження.

Швидкість за умовами механічної міцності обмежена номінальним значенням з 20–30% допустимим перевищенням; спеціальні двигуни, що призначені для роботи з ослабленим полем, допускають 3–4-кратне перевищення номінальної швидкості.

Струм якоря – координата, що визначає надійність роботи електроприводу. В тривалому режимі струм на всіх швидкостях не повинен перевищувати номінального значення при незалежному охолодженні двигуна – суцільні лінії зі штриховкою на рис.10.1.

В двигунах, що охолоджуються власним вентилятором, в тривалому режимі необхідно знижувати струм на 30–40% при низьких швидкостях – пунктир на рис.10.1 для недопущення недопустимого перегріву. Короткочасні (секунди) перевантаження за струмом обмежуються умовами комутації машини; допустимі перевантаження, як правило, не перевищують (2–3) I_n – лінії з подвійною штриховкою на рис.10.1. Недопустимий пуск електроприводу постійного струму (окрім малопотужних приводів) прямим включенням на номінальну напругу.

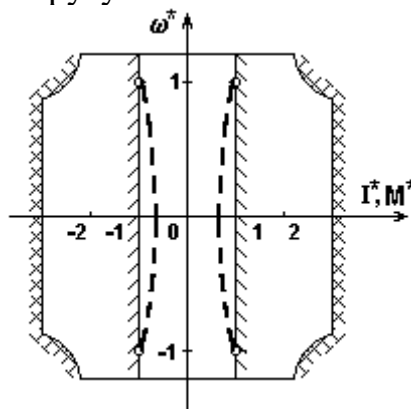


Рис.10.1.

Момент при повному потоці має ті ж обмеження, що і струм якоря. Таким чином, зона допустимих значень ω^* , I^* та M^* порівняно невелика, і рис.10.1 дає про неї деяку уяву: внутрішня область відноситься до тривалого режиму, зовнішня – до короткочасних (секунди) перевантажень.

10.2. Регулювання координат у розімкнених системах

Реостатне регулювання – найпростіший та найнесприятливіший спосіб регулювання швидкості та (або) моменту. В якірне коло послідовно, якщо живлення здійснюється від джерела напруги (рис.10.2,а), вмикаються додаткові резистори.

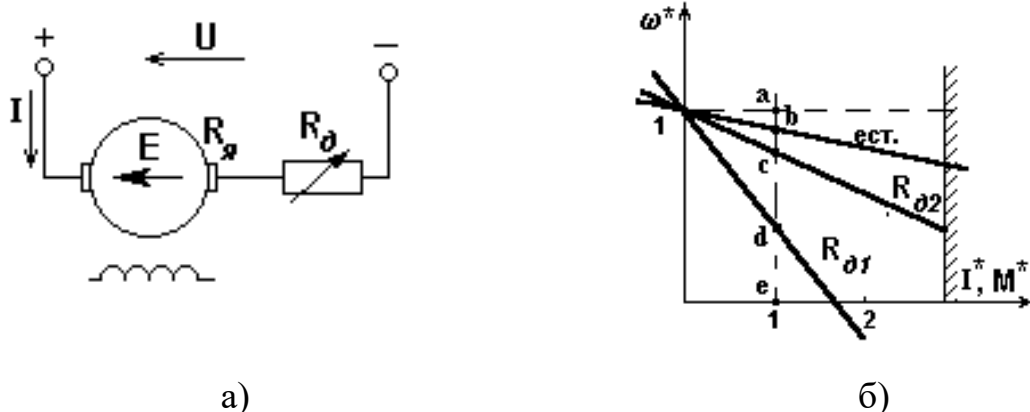


Рис.10.2. Схема (а) та характеристики (б) при реостатному регулюванні двигуна з незалежним збудженням

Швидкість ідеального холостого ходу при U_H та Φ_H і ввімкненні R_d не зміниться:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k \Phi_H},$$

а нахил характеристик (перепад швидкості) $\Delta\omega = \frac{IR}{k \Phi_H} = \frac{MR}{(k \Phi_H)^2}$ буде збільшуватися пропорційно $R = R_я + R_d$.

Скориставшись останнім рівнянням отримаємо при $I^* = M^* = 1$:

$$\Delta\omega^* = R^*, \quad (10.4)$$

де $\Delta\omega^* = 1 - \omega^*$, $R^* = \frac{R}{R_H} = \frac{RI_H}{U_H}$.

Співвідношення (10.4) дозволяє легко вирішувати пряму задачу – побудувати характеристики, якщо задано R , і обернену – знайти R та R_d для заданої характеристики. Так, на рис.10.2,б:

$$R_я = R_H \frac{ab}{ae}, \quad R_{д1} = R_H \frac{bc}{ae}, \quad R_{д2} = R_H \frac{cd}{ae},$$

$$R = R_я + R_{д1} + R_{д2} = R_H \frac{ad}{ae}.$$

В електроприводі з двигуном з послідовним збудженням при $U = U_H$ (рис.10.3,а) та відомій природній характеристиці:

$$\omega_{np} = \frac{U_H - I(R_я + R_3)}{k\Phi}$$

можна використати рівняння характеристик при реостатному регулюванні:

$$\omega_{шт} = \frac{U_H - I(R_я + R_3 + R_d)}{k\Phi}$$

та отримати співвідношення для розрахунку $\omega_{шт}$ для будь-якого струму:

$$\omega_{шт} = \omega_{np} \frac{U_H - I(R_я + R_3 + R_d)}{U_H - I(R_я + R_3)}. \quad (10.5)$$

Механічна характеристика може бути побудована по відомій залежності $M(I)$. Приблизний вигляд механічних характеристик при реостатному регулюванні показаний на рис.10.3,б. Під час живлення якірного кола від джерела струму ($I = const$) реостатне регулювання здійснюється ввімкненням R_d паралельно якорю – рис.10.4,а.

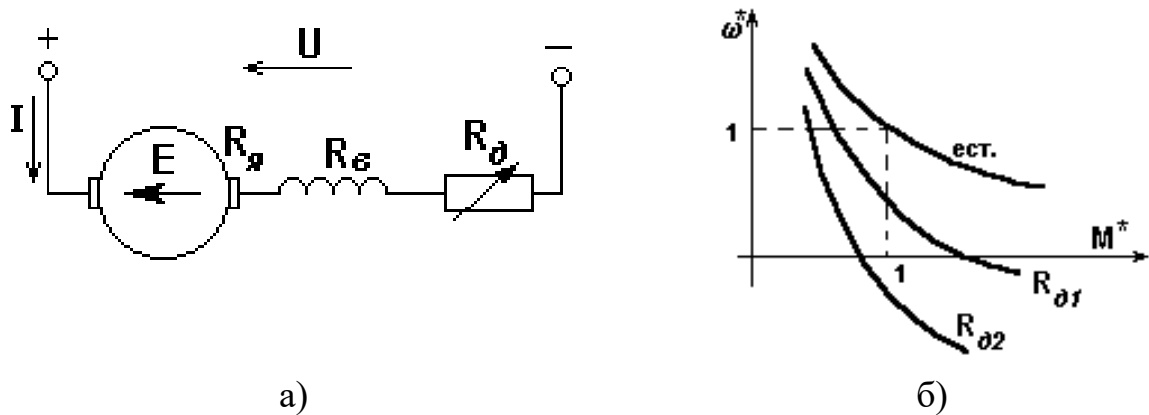


Рис.10.3.

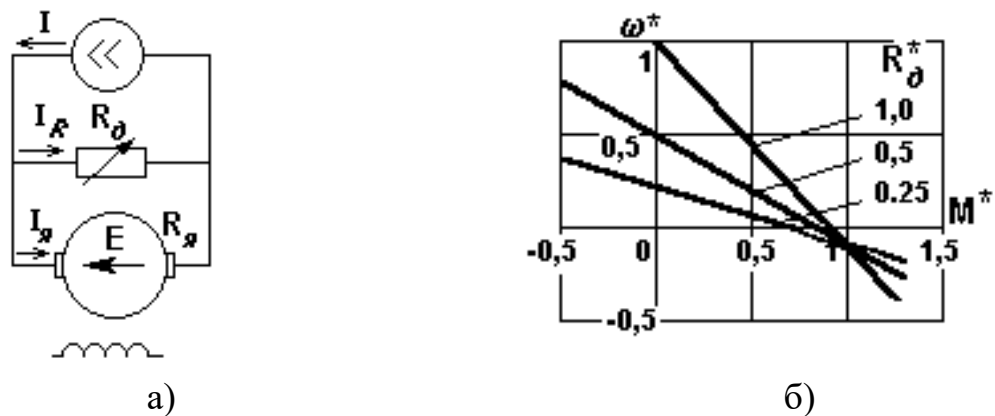


Рис.10.4.

Для схеми на рис.10.4,а реостатні характеристики можна отримати із основних рівнянь (10.1) та (10.2):

$$M^* = I_{я}^* \Phi^*$$

та

$$E^* = \Phi^* \omega^*,$$

що доповнені рівняннями для електричних кіл:

$$I^* = I_{я}^* + I_R^*,$$

$$E^* = I_R^* R_d^* - I_{я}^* R_{я}^*.$$

В даному випадку ми використали відносні величини, прийнявши за базові, як і раніше, U_n , I_n , Φ_n , ω_n .

Спільно вирішуючи рівняння можна отримати:

$$\omega^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*} - \frac{M^* (R_d^* + R_{я}^*)}{(\Phi^*)^2}. \quad (10.6)$$

Наявність контуру якір – додатковий резистор, в якому реалізується дія ЕРС обертання E , приводить до характеристик, що аналогічні традиційним, що отримані при живленні якоря від джерела напруги.

Відмінність полягає в тому, що швидкість ідеального холостого ходу складає:

$$\omega_0^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*}$$

зараз залежить від опору додаткового резистора R_d^* , а момент короткого замикання:

$$M_{к.з}^* = I^* \Phi^* \frac{R_d^*}{R_d^* + R_y^*} \approx I^* \Phi^*$$

при малих значеннях R_y^* , практично не залежить від R_d^* .

Таким чином, в системі джерело струму – двигун із шунтуючим резистором загальною точкою механічних характеристик при $\Phi = const$ та $R_d = var$ є точка короткого замикання, тоді як в системі джерело напруги – двигун при $R_d = var$ – точка ідеального холостого ходу. Приклади механічних характеристик при зміні R_d ($\Phi = \Phi_n$) приведені на рис.10.4,б. Напруга на виході джерела струму змінюється при $\Phi = const$ практично пропорційно швидкості:

$$U_{дс}^* = I_y^* R_d^* = \omega^* \Phi^* + \frac{M^* R_{ш}^*}{\Phi^*} \approx \omega^* \Phi^* .$$

Із графіків на рис.10.4,б видно, що реостатне регулювання швидкості в системі джерело струму – двигун більш сприятливе на малих швидкостях як з точки зору жорсткості характеристик – вона тим вище, чим менша швидкість – так і з точки зору втрат – вони зменшуються зі зменшенням швидкості.

Отже, отримаємо наступні оцінки реостатного способу регулювання.

1. Регулювання однозонне – вниз від основної швидкості, оскільки ввівши R_d ми збільшуємо $\Delta\omega$, і всі штучні характеристики в I квадранті розміщуються нижче природної.

2. Діапазон реостатного регулювання невеликий (2–2,5):1, при зміні M_c на 40 – 50%.

Стабільність швидкості низька, жорсткість характеристик падає з ростом R .

$$M = \frac{U_n c - \omega c^2}{R} ,$$

де $c = k\Phi_n$ (в подальшому, якщо необхідно підкреслити незмінність потоку збудження двигуна, будемо користуватися символом c).

Тоді $\beta = \frac{dM}{d\omega} = -\frac{c^2}{R} \equiv -\frac{1}{R}$. Ця властивість реостатного регулювання

часто значно ускладнює його використання: невелика випадкова зміна M_c на низьких швидкостях призводить до значної зміни ω .

3. Реостатне регулювання – ступінчасте, оскільки значення опору резистора в якірному колі допускає лише дискретну зміну. Отримання великої кількості ступенів є важким завданням, так як потребує великої кількості комутаційних апаратів (контакторів).

4. При прийнятих раніше допущеннях (зовнішній обдуг) можна вважати, що $M_{\text{доп}} = M_n$ на будь-якій реостатній характеристиці, оскільки магнітний потік є незмінним.

5. Втрати енергії при регулюванні значні та пов'язані з глибиною регулювання. Це безпосередньо впливає зі способу регулювання: швидкість змінюється за рахунок ввімкнення резистора – елемента, що перетворює електричну енергію, яка надходить до нього в тепло. Знайдемо кількісну оцінку втрат потужності (енергії) при реостатному регулюванні. Помноживши обидві частини рівняння (3.3) на I , отримаємо рівняння балансу потужностей:

$$UI = EI + I^2R,$$

де $UI = P_1$ – потужність, яка споживається з мережі; $EI = P_{\text{ем}}$ – електромагнітна потужність, що перетворюється в механічну; $I^2R = \Delta P$ – втрати потужності в якірному колі.

Виразивши U та E через магнітний потік та швидкість будемо мати:

$$\Delta P = k\Phi\omega_0 I - k\Phi\omega I = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1\Delta\omega^*. \quad (10.7)$$

Цей результат – втрати потужності пропорційні відносному перепаду швидкості – дуже важливий та універсальний і може застосовуватися до ряду інших випадків.

6. Капітальні затрати на реостатне регулювання порівняно невеликі: до двигуна додається тільки недорогий резистор та комутаційна апаратура.

Реостатне регулювання є досить недосконалим способом регулювання. Але він все ще досить широко застосовується на практиці (підйомно-транспортні установки, загальнопромислові механізми тощо) у випадках, коли джерелом живлення є мережа постійного струму. Це пояснюється практично відсутністю до останнього часу інших можливостей регулювати швидкість вниз від основної при живленні від мережі постійного струму ($U = U_n = \text{const}$).