

## Лекція №9

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ ТА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

### План лекції:

1. Енергетична діаграма асинхронного двигуна.
2. Рівняння обертаючого моменту асинхронного двигуна.
3. Залежність обертаючого моменту від ковзання, напруги, активної складової струму ротора
4. Механічна характеристика асинхронного двигуна.
5. Робочі характеристики асинхронного двигуна.

### 1 Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Електрична потужність, підведена до двигуна з мережі, перетворюється в ньому в механічну, що відбирається з валу машини.

Перетворення енергії супроводжується втратами.

Наочне уявлення про розподіл підведеної до двигуна потужності дає енергетична діаграма (рисунок 9.1).

До асинхронного двигуна з мережі підводиться потужність, Вт:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1. \quad (9.1)$$

Частина цієї потужності витрачається на втрати в сталі машини –  $P_{ст}$  і на втрати в міді статора, тобто на нагрів обмотки статора

$$P_{м.ст} = 3I_{1\phi}^2 r_1. \quad (9.2)$$

Остання потужність електромагнітним шляхом передається на ротор і називається електромагнітною потужністю  $P_{ем}$ .

Частина потужності, що передається на ротор, витрачається на нагрів міді обмоток ротора

$$P_{м.рот} = 3I_{2\phi}^2 r_1. \quad (9.3)$$

Потужність, що залишилася називається повною механічною потужністю  $P_{мех}$ .

Якщо з повної механічної потужності відняти механічні втрати  $P_{мех.втр}$  і додаткові втрати  $P_{дод}$ , то отримаємо корисну потужність на валу двигуна  $P_2$ . Цю величину потужності в кіловатах позначають на заводському щитку двигуна.

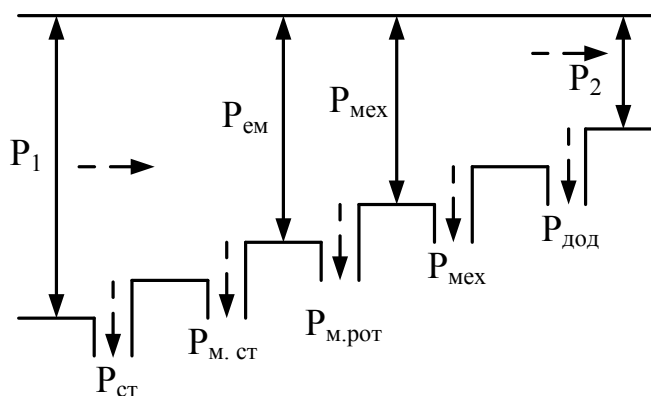


Рисунок 9.1 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Для того, щоб отримати величину потужності  $P_1$ , що споживається двигуном з мережі, необхідно корисну потужність  $P_2$  розділити на к. к. д. двигуна

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad (9.4)$$

К. к. д. асинхронного двигуна можна визначити з формули

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} \quad (9.5)$$

де  $P_1$  – підведена до двигуна потужність (9.1);

$$P_1 = \sum P = P_{ст} + P_{м.ст} + P_{м.рот} + P_{мех} + P_{дод} \quad (9.6)$$

Величина к. к. д. асинхронних двигунів знаходиться в межах від 0,7 до 0,9 і вище, причому для потужніших двигунів цей показник вищий.

Як видно з енергетичної діаграми (рисунок 9.1), різниця між електромагнітною потужністю  $P_{em}$  і повною механічною потужністю ротора  $P_{m.rot}$  дорівнює втратам в міді ротора

$$P_{m.rot} = P_{em} - P_{mex}.$$

Але механічна потужність ротора

$$P_{mex} = MW_2 = M \frac{2\pi n_2}{60}, \quad (9.7)$$

де  $M$  – момент двигуна, що обертає, Н·м;  
 $n_2$  – число оборотів ротора, об/хв.

Електромагнітна потужність магнітного поля  $P_{em}$ , що обертається, дорівнює

$$P_{em} = MW_1 = M \frac{2\pi n_1}{60}, \quad (9.8)$$

де  $n_1$  – число обертів магнітного поля статора за хвилину.

Але так як  $n_2 = n_1(1 - s)$ , то

$$P_{m.rot} = P_{em} - M \frac{2\pi n_1(1 - s)}{60}.$$

Так як  $P_{em} = M \frac{2\pi n_1}{60}$ ,

то

$$P_{m.rot} = P_{em} - P_{em}(1 - s) = P_{om} - P_{em} + P_{em}s = sP_{em}. \quad (9.9)$$

тобто електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню.

## 2 Рівняння обертаючого моменту асинхронного двигуна

Обертаючий момент можна виразити через втрати в міді ротора. Оскільки

$$M = \frac{P_{em}}{W_1},$$

де  $W_1 = \frac{2\pi f_1}{60}$ , а так як  $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ ,

то

$$W_1 = \frac{2\pi 60 f_1}{60 p} = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (9.10)$$

Замість  $P_{em}$  підставимо його значення з формули (9.9)

$$P_{em} = \frac{P_{m.pom}}{s}.$$

Тоді

$$M = \frac{P_{em}}{W_1} = \frac{P_{m.pom}}{i W_1} = \frac{m I_2'^2 r_2}{W_1 s}. \quad (9.11)$$

тобто обертовий момент асинхронного двигуна, що обертає, пропорційний втратам в міді ротора.

Оскільки при приведенні вторинних величин до первинної обмотки втрати в міді не змінюються, то у формулу (9.11) можна підставити приведені величини.

$$M = \frac{m (I_2')^2 \frac{r_2'}{s}}{W_1}. \quad (9.12)$$

Підставивши у формулу (9.11) значення струму  $I_2'$  з формули (8.38) (лекція 8) і значення  $W_1$  з формули (9.10), отримаємо

$$M = \frac{mp U_{1\phi}^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_1')^2 \right]}. \quad (9.13)$$

де  $U_{1\phi}$  – фазна напруга обмотки статора, а інші величини нам відомі.

З цієї формули потрібно зробити основний висновок: момент асинхронного двигуна, що обертається, пропорційний квадрату напруги мережі, що підводиться до статора,

$$M \equiv U_{1\phi}^2.$$

тобто асинхронні двигуни чутливі до коливань напруги в мережі.

Як видно з векторної діаграми асинхронного двигуна (рисунок 8.5, в) (лекція 8),

$$I_2' \frac{r_2'}{s} = E_2' \cos \psi_2,$$

де  $\psi_2$  – кут зсуву між векторами  $E_2'$  і  $I_2'$ .

Підставивши цей вираз у формулу (9.12), отримаємо

$$M = \frac{mI_2'}{W_1} E_2' \cos \psi_2,$$

оскільки  $E_2' = E_1$ , підставимо в цю формулу значення  $E_1$  отримаємо

$$M = \frac{mI_2'}{W_1} 4,44K_{об1} f_1 W_1 \Phi_m \cos \psi_2. \quad (9.14)$$

Оскільки величини

$$C_m = \frac{m4,44K_{об1}}{\omega_1} f_1 \omega_1, \quad (9.15)$$

для даного двигуна є постійними, тобто

$$C_m = const.$$

то формулу моменту можна написати так

$$M = C_m \Phi_m I_2' \cos \psi_2, \quad (9.16)$$

тобто момент двигуна, що обертає, залежить від результуючого магнітного потоку двигуна і від величини активного струму ротора.

Ця формула ідентична формулі моменту двигуна постійного струму.

Підставляючи у формулу (9.13) різні значення ковзання  $s$ , при різному навантаженні двигуна можна побудувати криву залежності моменту, що обертає, від ковзання, при постійній напрузі і частоті мережі рисунок 9.2.

При ковзанні  $s = 1$ , коли  $n_2 = 0$ , двигун розвиває пусковий момент  $M_n$ . По мірі розгону двигуна ковзання зменшується, а момент двигуна, що обертається, збільшується. При пуску двигуна в хід, коли

$s = 1$ , частота струму в роторі  $f_2 = f_1 = 50$  Гц індуктивний опір  $x_2$  ротора має максимальне значення, кут  $\psi_2$  між векторами струму і ЕРС найбільший, а  $\cos \psi_2$  найменший, тому і момент, що обертається, при пуску найбільший, що видно з рівняння моменту (9.16).

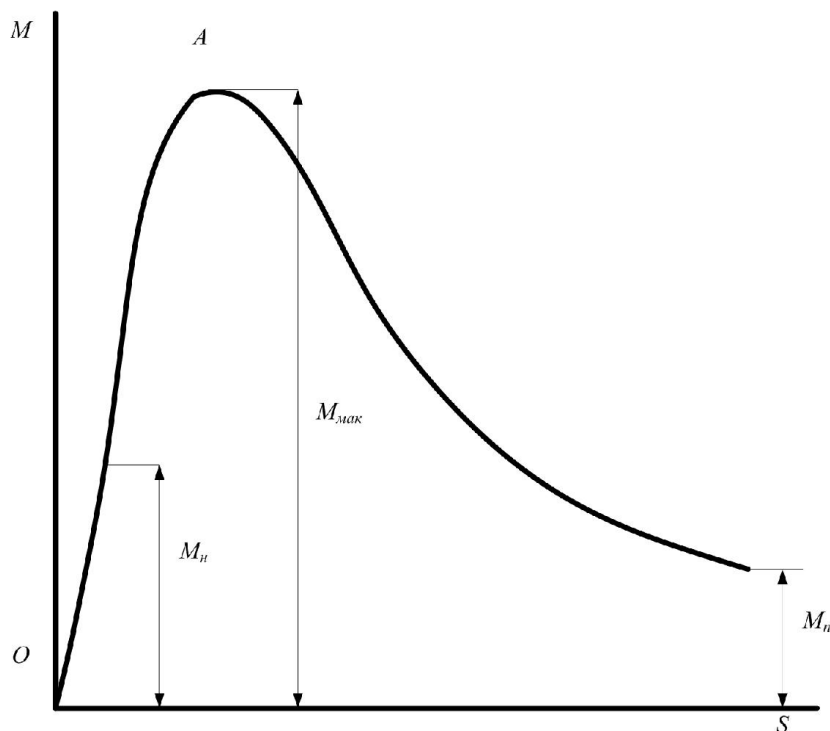


Рисунок 9.2 – Залежність обертового моменту асинхронного короткозамкненого двигуна від ковзання

При розгоні двигуна частота струму в роторі  $f_2 = sf_1$  зменшується, унаслідок чого знижується його індуктивний опір, що приводить до зменшення кута  $\psi_2$ , і збільшення моменту, що обертається.

Максимального значення  $M_{\max}$  обертовий момент, що досягається при максимальному ковзанні, яке визначають з формули

$$s_{\max} = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} = \frac{r_2'}{x_k}. \quad (9.17)$$

Формулу максимального ковзання отримуємо шляхом дослідження рівняння моменту (9.13) на максимум, для чого беремо похідну  $\frac{dM}{ds}$  цього рівняння і прирівнюємо її до нуля.

Область стійкої роботи двигуна показана на ділянці кривої  $OA$ , коли із зростанням навантаження ковзання збільшується. На цій ділянці кривої і знаходиться точка, що відповідає номінальному моменту двигуна  $M_n$ . З кривої видно, що в межах номінальної потужності момент двигуна, що обертається, пропорційний ковзанню. Зазвичай в асинхронних двигунів номінальний момент  $M_n$  розвивається при ковзанні, рівному 3-5%. Найбільший момент, що розвивається двигуном, називається максимальним моментом  $M_{\text{макс}}$ .

Перевантаження двигуна моментом опору робочої машини, що рівний максимальному, приводить до зупинки двигуна. Відношення  $\frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$  характеризує перевантажувальну здатність двигуна.

Для асинхронних трифазних двигунів потужністю до 100 кВт  $\frac{M_{\text{макс}}}{M_n} \geq 1,7 - 2,2$ ; причому більша цифра відноситься до двигунів з вищими швидкостями обертання. Відношення  $\frac{M_n}{M_n}$  характеризує пускові властивості двигуна,  $\frac{M_n}{M_n} \geq 1,0 - 2,0$ , для двигунів меншої потужності це відношення більше.

Якщо в рівняння моменту (9.13) підставити значення максимального ковзання (9.17), то отримаємо рівняння максимального моменту двигуна

$$M_{\text{макс}} = \frac{pmU_1^2}{2\pi f 2[r' + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)}]} \quad (9.18)$$

З цього рівняння видно, що величина максимального моменту двигуна не залежить від величини активного опору кола ротора  $r_2'$ , оскільки ця величина у формулу (9.18) не входить, але від величини опору в колі ротора  $r_2'$  залежить максимальне ковзання, тобто та величина ковзання, при якій двигун розвиватиме максимальний момент.

Це питання має особливе значення для двигунів з фазним ротором.

Необхідно добиватися такого положення, щоб при пуску двигун розвивав максимальний момент, а ковзання в початковий момент пуску дорівнювало одиниці. Підставивши це значення ковзання у формулу (9.17), отримаємо

$$1 = \frac{r'_2}{x_k}; \quad r'_2 = x_k, \quad (9.19)$$

тобто максимальний момент, що обертається, при пуску асинхронного двигуна розвиватиме за умови, що  $r'_2 = x_k$ , коли приведений активний опір кола ротора дорівнює загальному індуктивному опору приведенного двигуна.

Під  $r'_2$  розуміють опір обмотки ротора і пускового реостата в колі ротора

$$r'_2 = r'_{\text{рот}} + r'_{\text{реост}}. \quad (9.20)$$

Зазвичай  $r_{\text{реост}}$  на одну фазу беруть в 8-10 разів більше опору однієї фази ротора, тобто

$$r'_{\text{реост}} = (8 - 10)r_{\text{рот}}.$$

Момент асинхронного двигуна, що обертається, можна також визначити за формулою, як і для двигуна постійного струму

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}.$$

### **3 Залежність обертаючого моменту від ковзання, напруги, активної складової струму ротора**

Електромагнітний момент асинхронного двигуна створюється взаємодією струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем. Електромагнітний момент  $\dot{M}$  пропорційний електромагнітній потужності

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{W_1}, \quad (9.21)$$



де

$$W_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (9.22)$$

– кутова синхронна швидкість обертання.

Підставивши у вираз (9.21) значення електромагнітної потужності отримаємо

$$M = \frac{P_{e2}}{W_1 s} = \frac{m_1 (I'_2)^2 r'_2}{W_1 s}, \quad (9.23)$$

тобто електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний потужності електричних втрат в обмотці ротора.

Відповідно отримаємо формулу електромагнітного моменту асинхронної машини

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 s \left[ \left( r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}. \quad (9.24)$$

Параметри схеми заміщення асинхронної машини,  $r_1, r'_2, x_1$  і  $x'_2$ , що входять у вираз (9.24), є постійним і, так як їх значення при змінах навантаження машини залишається практично незмінним. Також постійними можна вважати напругу на обмотці фази статора  $U_1$  частоту. У виразі моменту  $M$  єдина змінна величина – ковзання  $s$ , яке для різних режимів роботи асинхронної машини може приймати різні значення в діапазоні від  $+\infty$  до  $-\infty$ .

Розглянемо залежність від моменту ковзання  $M = f(s)$  при  $U_1 = const$ ,  $f_1 = const$  і постійних параметри схеми заміщення. Цю залежність прийнято називати механічною характеристикою асинхронної машини. Аналіз виразу (9.24), що представляє собою аналітичний вираз механічної характеристики  $M = f(s)$  показує, що при значеннях ковзання  $s = 0$  і  $s = \infty$  електромагнітний момент  $M = 0$ . З цього випливає, що механічна характеристика  $M = f(s)$  має максимум.

Для визначення величини критичного ковзання  $s_{кр}$ , відповідного максимального моменту, необхідно взяти першу похідну від (9.24) і прирівняти її до нуля:  $\frac{dM}{ds} = 0$ . В результаті

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (9.25)$$

Підставивши значення критичного ковзання за (9.25) у вираз електромагнітного моменту (9.24), після ряду перетворень отримаємо вираз максимального моменту прийме наступний вигляд

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}. \quad (9.26)$$

У виразах (9.25) і (9.26) знак плюс відповідає двигунному, а знак мінус – генераторного режиму роботи асинхронної машини.

Для асинхронних машин загального призначення активний опір обмотки статора  $r_1$ , набагато менше суми індуктивних опорів:  $r_1 \ll (x_1 + x_2')$ . Тому, нехтуючи величиною  $r_1$  отримаємо спрощені вирази критичного ковзання

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}, \quad (9.27)$$

і максимального моменту

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (x_1 + x_2')}. \quad (9.28)$$

Аналіз виразу (9.27) показує, що максимальний момент асинхронної машини у генераторному режимі більше, ніж у двигунному ( $M_{\max g} > M_{\max d}$ ). На рисунку 9.3 показана механічна характеристика асинхронної машини  $M = f(s)$  при  $U_1 = const$ . На цій характеристиці вказані зони, відповідні різним режимам роботи: двигунний режим ( $0 < s \leq 1$ ), коли електромагнітний момент  $M$  є обертаючим;

генераторний режим ( $-\infty < s \leq 0$ ) і гальмівний режим противключення ( $1 < s \leq +\infty$ ), коли електромагнітний момент  $M$  є гальмуючим.

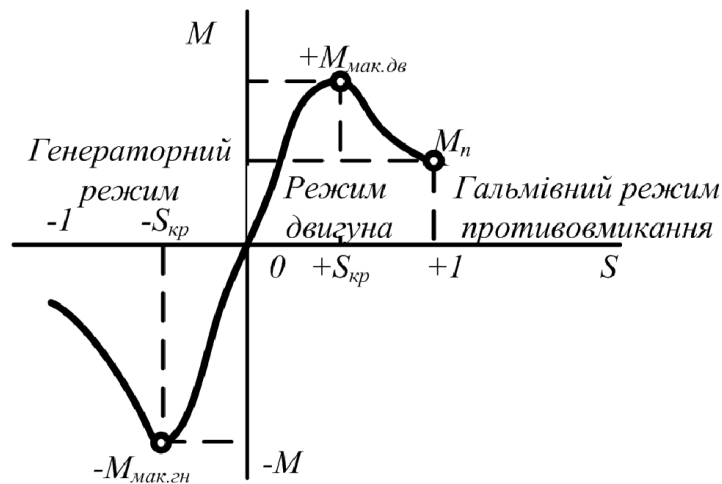


Рисунок 9.3 – Залежність режимів роботи машини від ковзання

З (9.24) випливає, що електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги мережі:  $M \equiv U_1^2$ . Це значною мірою впливає на експлуатаційні властивості двигуна: навіть невелике зниження напруги мережі викликає помітне зменшення обертаючого моменту асинхронного двигуна. Наприклад, при зменшенні напруги мережі на 10% щодо номінального ( $U_1 = 0,9U_{1ном}$ ) електромагнітний момент двигуна зменшується на 19%:  $M' = 0,9^2 M = 0,81M$ , де  $M$  – момент при номінальній напрузі мережі, а  $M'$  – момент при зниженій напрузі.

Для аналізу роботи асинхронного двигуна зручніше скористатися механічною характеристикою  $M = f(s)$ , що представлена на рисунку 9.3. При включенні двигуна в мережу магнітне поле статора, не володіючи інерцією, відразу ж починає обертання з синхронною частотою  $n_1$ , в той же час ротор двигуна під впливом сил інерції в початковий момент пуску залишається нерухомим ( $n_2 = 0$ ) і ковзання  $s = 1$ .

Підставивши у (9.24) ковзання  $s = 1$ , отримаємо вираз пускового моменту асинхронного двигуна

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2]} \quad (9.29)$$

Під дією цього моменту починається обертання ротора двигуна, при цьому ковзання зменшується, а обертовий момент зростає відповідно з характеристикою  $M = f(s)$ . При критичному ковзанні  $s_{кр}$  момент досягає максимального значення  $M_{макс}$ . З подальшим зростанням частоти обертання (зменшенням ковзання) момент  $M$  починає спадати, поки не досягне встановленого значення, що дорівнює сумі протидіючих моментів, прикладених до ротора двигуна: моменту н. х.  $M_0$  та корисного навантаження моменту (моменту на валу двигуна)  $M_2$ , тобто

$$M = M_0 + M_2 = M_{cm} \quad (9.30)$$

Слід мати на увазі, що при ковзаннях, близьких до одиниці (пусковий режим двигуна), параметри схеми заміщення асинхронного двигуна помітно змінюють свої значення. Пояснюється це в основному двома факторами: посиленням насичення магнітних зубцевих шарів статора та ротора, що веде до зменшення індуктивних опорів розсіювання  $x_1$  і  $x_2$ , і ефектом витіснення струму в стержнях ротора, що веде до збільшення активного опору обмотки ротора  $r_2'$ . Тому параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, що використовуються при розрахунку електромагнітного моменту за (9.24), (9.26) і (9.28), не можуть бути використані для розрахунку пускового моменту за (9.29).

Статичний момент  $\dot{I}_{но}$  дорівнює сумі протидіючих моментів при рівномірному обертання ротора ( $n_2 = const$ ). Припустимо, що протидіючий момент на валу двигуна  $M_2$  відповідає номінальному навантаженні двигуна. У цьому випадку сталий режим роботи двигуна визначиться точкою на механічній характеристиці з координатами

тами  $M = M_{ном}$  і  $s = s_{ном}$ , де  $M_{ном}$  і  $s_{ном}$  – номінальні значення електромагнітного моменту і ковзання.

З аналізу механічної характеристики також випливає, що стабільна робота асинхронного двигуна можлива при ковзаннях менше критичного ( $s < s_{кр}$ ), тобто на ділянці  $OA$  (рисунок 9.2, 9.3) механічної характеристики. Справа в тому, що саме на цій ділянці зміна навантаження на валу двигуна супроводжується відповідною зміною електромагнітного моменту. Так, якщо двигун працював в номінальному режимі ( $M_{ном}; s_{ном}$ ), то мала місце рівність моментів:  $M_{ном} = M_o + M_2$ . Якщо відбулося збільшення навантаження моменту  $M_2$  до значення  $M'_2$ , то рівність моментів порушиться, тобто.  $M_{ном} < M_o + M'_2$ , і частота обертання ротора почне зменшуватися (ковзання буде збільшуватися). Це призведе до зростання електромагнітного моменту до значення  $M' = M_o + M'_2$  (точка  $B$ ), після чого режим роботи двигуна знову стане сталим. Якщо ж при роботі двигуна в номінальному режимі відбудеться зменшення навантаження моменту до значення  $M''_2$ , то рівність моментів знову порушиться, але тепер обертаючий момент виявиться більше суми протидіючих:  $M_{ном} > M_o + M''_2$ . Частота обертання ротора почне зростати (ковзання буде зменшуватися), і це призведе до зменшення електромагнітного моменту  $M$  до значення  $M'' = M_o + M''_2$  (точка  $C$ ); стійкий режим роботи буде знову відновлено, але вже при інших значеннях  $M$  і  $s$ .

Робота асинхронного двигуна стає нестійкою при ковзаннях  $s \geq s_{кр}$ . Так, якщо електромагнітний момент двигуна  $M = M_{макс}$ , а ковзання  $s = s_{кр}$ , то навіть незначне збільшення навантаження моменту  $M_2$ , викликавши збільшення ковзання  $s$ , призведе до зменшення електромагнітного моменту  $M$ . За цим піде подальше збільшення ковзання, поки ковзання не досягне значення  $s = 1$ , тобто поки ротор двигуна не зупиниться.

Таким чином, при досягненні електромагнітним моментом максимального значення настає межа стійкої роботи асинхронного двигуна. Отже, для стійкої роботи двигуна необхідно, щоб сума на-

вантажувальних моментів, діючих на ротор, була менше максимального моменту:  $M_{ст} = M_o + M_2 < M_{мак}$ . Але щоб робота асинхронного двигуна була надійною і щоб випадкові короточасні перевантаження не викликали зупинки двигуна, необхідно, щоб він мав перевантажувальної здатністю. Перевантажувальна здатність двигуна  $\lambda$  визначається відношенням максимального моменту  $M_{мак}$  до номінального  $M_{ном}$ . Для асинхронних двигунів загального призначення перевантажувальна здатність становить  $\lambda = \frac{M_{мак}}{M_n} = 1,7 - 2,5$ .

Слід також звернути увагу на те, що робота двигуна при ковзанні  $s < s_{кр}$ , тобто на робочій ділянці механічної характеристики, є найбільш економічною, так як вона відповідає малим значень ковзання, а отже, і меншим значенням електричних втрат в обмотці ротора.

#### 4 Механічна характеристика асинхронного двигуна

Електромагнітний момент асинхронного двигуна, а також його максимальне і пускове значення пропорційні квадрату напруги, що підводиться до обмотки статора  $M \equiv U_1^2$ . Водночас значення критичного ковзання не залежить від напруги  $U_1$ . Це дає нам можливість побудувати механічні характеристики  $M = f(s)$  для різних значень напруги  $U_1$  (рисунок 9.4), з яких випливає, що коливання напруги мережі  $U_1$  щодо його номінального значення  $U_{1ном}$  супроводжуються не тільки змінами максимального і пускового моментів, але і змінами частоти обертання ротора. Зі зменшенням напруги мережі частота обертання ротора знижується (ковзання збільшується). Напруга  $U_1$  впливає на значення максимального моменту  $M_{мак}$ , а також на перевантажувальну спроможність двигуна  $\lambda = M_{іае} / M_{ііі}$ . Так, якщо напруга  $U_1$  знизилася на 30 %, тобто,  $U_1 = 0,7U_{1ном}$ , то максимальний момент двигуна зменшиться більш ніж удвічі:  $M'_{макс} = 0,7^2 M_{макс} = 0,49M_{макс}$ . На скільки зменшиться перевантажу-

вальна здатність двигуна? Якщо, наприклад, при номінальній напрузі мережі перевантажувальна здатність  $\lambda = M_{\text{мак}} / M_{\text{ном}} = 2$ , то при зниженні напруги на 30 % перевантажувальна здатність двигуна  $\lambda' = M'_{\text{мак}} / M_{\text{ном}} = 0,49 \cdot M'_{\text{мак}} / M_{\text{ном}} = 0,49 \cdot 2 = 0,98$ , тобто двигун не в змозі нести навіть номінальне навантаження.

Значення максимального моменту двигуна не залежить від активного опору ротора  $r'_2$ . Що ж стосується критичного ковзання  $s_{\text{кр}}$ , воно пропорційно опору  $r'_2$ . Таким чином, якщо в асинхронному двигуні поступово збільшувати активний опір кола ротора, то значення максимального моменту буде залишатися незмінним, а критичне ковзання буде збільшуватися (рисунок 9.4). При цьому пусковий момент двигуна  $M_n$  зростає із збільшенням опору  $r'_2$  до деякого значення. На рисунку це відповідає опору  $r'_{2\text{III}}$ , при якому пусковий момент дорівнює максимальній. При подальшому збільшенні опору  $r'_2$  пусковий момент зменшується.

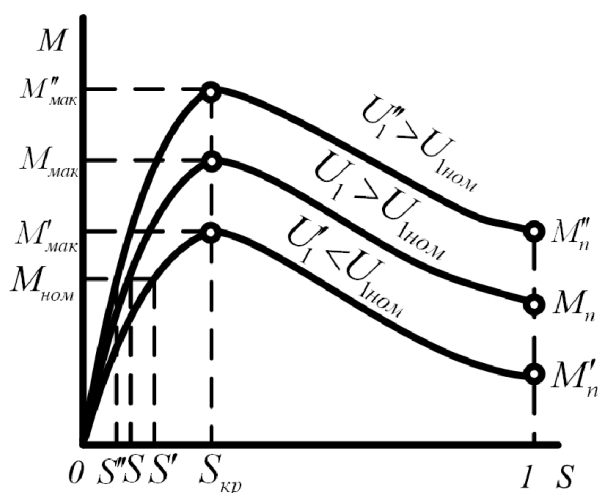


Рисунок 9.4 – Вплив напруги на вид механічної характеристики асинхронного двигуна

Аналіз графіків  $M = f(s)$ , наведених на рисунку 9.5, також показує, що зміни опору ротора  $r'_2$  супроводжуються змінами частоти обертання: зі збільшенням  $r'_2$  при незмінному навантажувальному моменті  $M_{\text{ст}}$  ковзання збільшується, тобто частота обертання зменшується (точки 1, 2, 3 і 4).

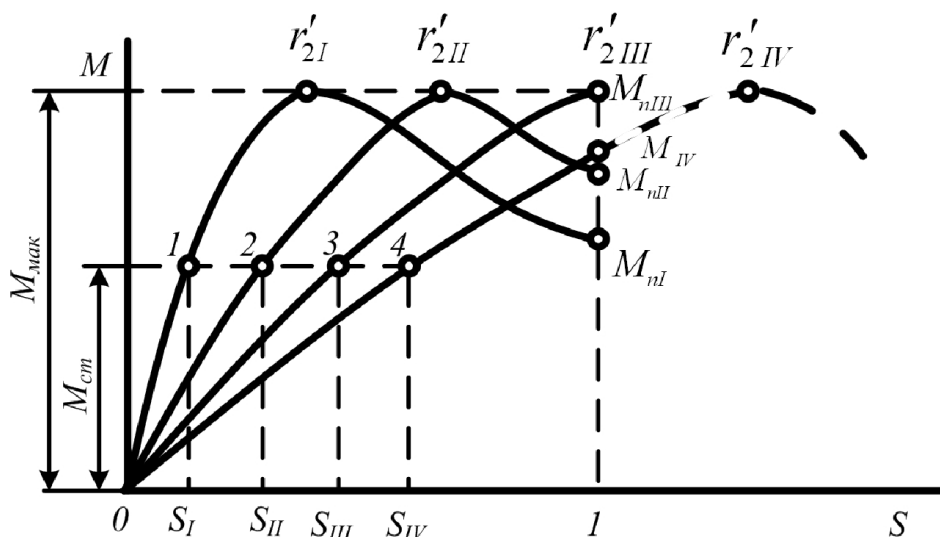


Рисунок 9.5 – Вплив активного опору обмотки ротора на механічну характеристику асинхронного двигуна

Вплив активного опору обмотки ротора на форму механічних характеристик асинхронних двигунів використовується при проектуванні двигунів. Наприклад, асинхронні двигуни загального призначення повинні мати "жорстку" швидкісну характеристику, тобто працювати з невеликим номінальним ковзанням. Це досягається застосуванням у двигуні обмотки ротора з малим активним опором  $r'_2$ . При цьому двигун має більш високий ККД за рахунок зниження електричних втрат в обмотці ротора ( $P_{e2} = m_1 I_2'^2 r_2'$ ). Вибране значення  $r'_2$  повинно забезпечити двигуну необхідне значення пускового моменту. При необхідності отримати двигун з підвищеним значенням пускового моменту збільшують активний опір обмотки ротора.

Але при цьому отримують двигун з великим значенням номінального ковзання, а отже, з меншим ККД.

Розглянуті залежності  $M = f(U_1)$  і  $M = f(r'_2)$  також мають велике практичне значення при розгляді питань пуску і регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.

## 5 Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочими характеристиками асинхронного двигуна називають залежність потужності, що споживається,  $P_1$  первинного стру-



му  $I_1$ , коефіцієнта потужності  $\cos \varphi_1$ , моменту на валу  $M_2$ , ковзання  $s$  і  $ККД$   $\eta$  від корисної потужності  $P_2$  при роботі з номінальними напругами і частотою. Робочі характеристики дозволяють знаходити всі інші величини, що визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях. Ці характеристики можливо побудувати як по розрахунковим даним при проектуванні двигуна, так і за дослідним, при дослідах двигуна. На рисунку 9.6 зображені робочі характеристики асинхронного двигуна потужності 15 кВт. При  $P_2 = 0$  величини  $I_1$  і  $\cos \varphi_1$  відповідають режиму холостого ходу.

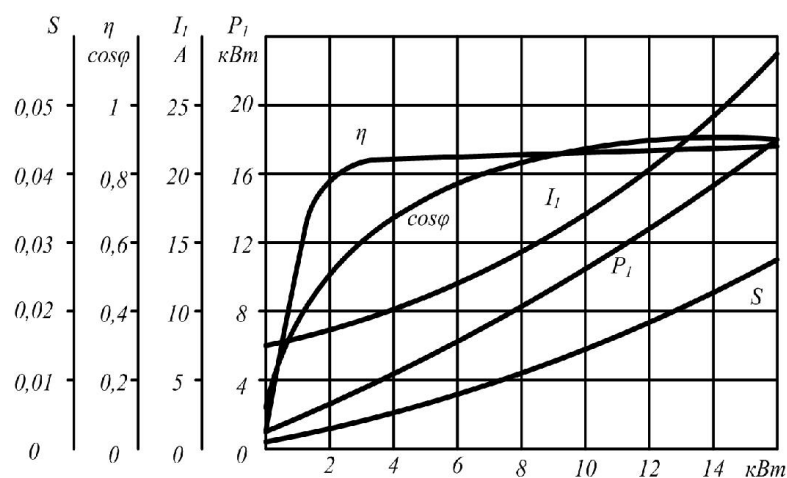


Рисунок 9.6 – Робочі характеристики асинхронного двигуна 15 кВт

### Контрольні запитання

1. Що слід розуміти під енергетичною діаграмою асинхронного двигуна?
2. Зобразити енергетичну діаграму асинхронного двигуна і пояснити величини, які входять до неї.
3. Пояснити, чому електричні втрати асинхронного двигуна пропорційні ковзанню.
4. Яким шляхом передається потужність підведена до статора асинхронного двигуна на його ротор?
5. Напишіть формулу електромагнітного моменту асинхронного двигуна через електромагнітні величини і поясніть її.

6. Який характер має залежність електромагнітного моменту від ковзання при малих значеннях ковзання ( $s \ll 1$ )?
7. Який характер має залежність електромагнітного моменту від ковзання при ковзаннях близьких до одиниці?
8. Поясніть, чому максимальний момент асинхронної машини в режимі генератора більший ніж в режимі двигуна?
9. Як визначається пусковий момент асинхронного двигуна?
10. Що слід розуміти під перевантажувальною та пусковою здатністю асинхронного двигуна і в яких межах лежить ці величини?
11. З яких ділянок складається механічна характеристика асинхронного двигуна, як пояснити роботу машини на цих ділянках?
12. Як залежить електромагнітний момент асинхронного двигуна від напруги мережі?
13. Поясніть механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні напруги.
14. Чому квадратична залежність моменту асинхронного двигуна від напруги мережі є недоліком двигуна?
15. Поясніть механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні опору в колі ротора.
16. В яких двигунах та яким чином можна змінювати активний опір кола ротора?
17. В яких межах можна змінювати пусковий момент асинхронного двигуна при зміні опору в колі ротора?
18. В чому перевага асинхронного двигуна з контактними кільцями перед двигуном з короткозамкненим ротором?
19. Що слід розуміти під робочими характеристиками асинхронного двигуна ?
20. 9. Поясніть швидкісну характеристику асинхронного двигуна. Чому при НХ частоту обертання ротора можна вважати приблизно рівною синхронній?
21. Пояснити, як змінюються струм та потужність, що споживаються з мережі при зміні навантаження двигуна?