

Лекція 4. Моделювання приводних зусиль і сил опору машин

Моделювання приводних зусиль

При вивченні фізичних або хімічних процесів, що відбуваються в електричних, гідравлічних або теплових двигунах, розглядають звичайно досить складні фізичні моделі. Однак при розв'язуванні задач динаміки машин нас цікавлять тільки ті властивості двигунів, які визначають характер їх взаємодії з іншими функціональними частинами машини. Ці властивості визначаються механічними характеристиками двигунів, що представляють собою залежності між законами зміни в часі вхідного параметра $u(t)$, узагальненої координати вихідної ланки $x(t)$ і узагальненої рушійної сили $Q(t)$.

Вибравши ту або іншу форму характеристики двигуна, ми тим самим вибираємо його динамічну модель. Залежно від ступеня ідеалізації властивостей двигуна прийнято розрізняти кілька видів його характеристик [4].

Ідеальна кінематична характеристика виходить при припущенні, що узагальнена швидкість вихідної ланки $\dot{x}(t)$ в кожному момент часу залежить тільки від значення вхідного параметра в цей же момент і не залежить від узагальненої сили:

$$\dot{x}(t) = f(u). \quad (1.51)$$

Така характеристика виявляється прийнятною в ряді випадків для опису властивостей „жорстких” двигунів, у яких швидкість вихідної ланки слабо залежить від навантаження або взагалі від нього не залежить (наприклад синхронний електричний двигун) (рис. 1.7, а).

Припускаючи, що узагальнена рушійна сила не залежить від швидкості вихідної ланки й визначається тільки значенням вхідного параметра, одержуємо іншу ідеалізовану модель двигуна, яка називається **ідеальна силова характеристика**. Вона описується таким рівнянням:

$$Q(t) = f(u). \quad (1.52)$$

Ця характеристика може бути прийнята для деяких типів „м'яких” двигунів, у яких узагальнена рушійна сила слабо залежить від швидкості („м'які” характеристики мають, наприклад, двигуни внутрішнього згорання) (рис. 1.7, б).

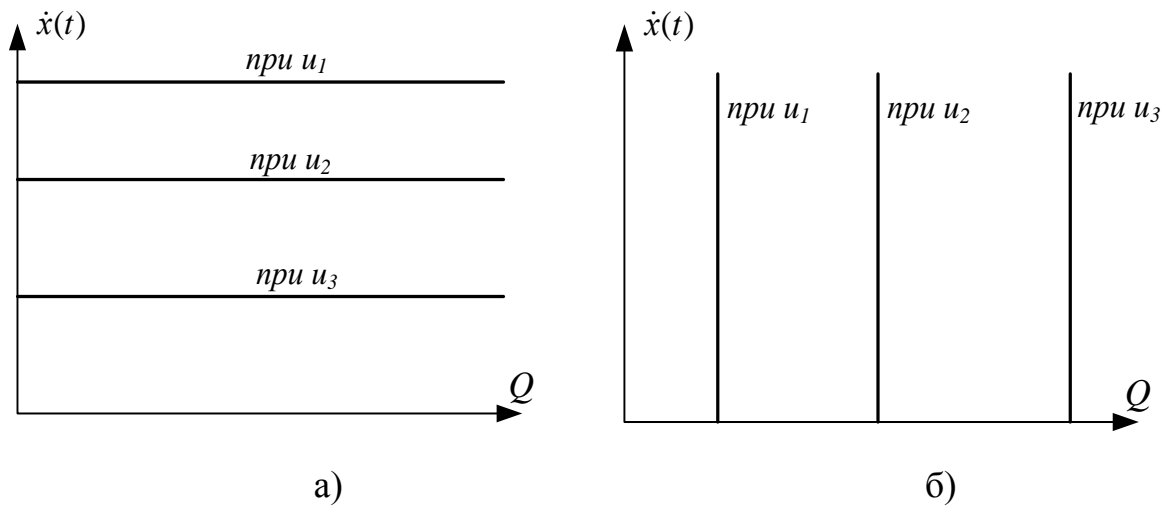


Рис. 1.7. Механічні характеристики двигунів: а) ідеальна кінематична; б) ідеальна силова

При використанні ідеальної кінематичної характеристики часто говорять, що двигун є „джерелом швидкості”, а у випадку ідеальної силової характеристики – „джерелом сили (моменту)”. Ідеальними характеристиками звичайно користуються на перших етапах проектування машини, коли відомий тільки тип двигуна й необхідно оцінити необхідну потужність.

У реальних двигунах узагальнена швидкість вихідної ланки залежить не тільки від значення вхідного параметра, але й від навантаження, яке характеризується величиною узагальненої сили. Як правило, зі збільшенням навантаження швидкість зменшується. Враховуючи цей зв’язок, приходимо до **статичної характеристики двигуна**:

$$\dot{x} = f(Q, u), \quad (1.53)$$

яка також може бути представлена у такій формі:

$$Q = f(u, \dot{x}). \quad (1.54)$$

Існують двигуни, у яких процес перетворення енергії носить циклічний характер. До них відносяться, наприклад, поршневі двигуни внутрішнього згорання. У таких двигунах рушійний момент залежить не тільки від швидкості, але й від координати вихідної ланки, і статична характеристика представляється у формі:

$$Q = f(u, x, \dot{x}) \quad (1.55)$$

або

$$\dot{x} = f(Q, u, x). \quad (1.56)$$

Статичні характеристики двигунів адекватно відображають їхні властивості при статичних режимах роботи, тобто в тих випадках, коли параметри u , Q , \dot{x} , є постійними по величині або змінюються досить повільно.

У загальному випадку через інерційність фізико-хімічних процесів, що протікають у двигуні, значення швидкості вихідної ланки в даний момент часу залежить не тільки від миттєвого значення навантаження, але й від значень її похідних за часом. У першому наближенні ця залежність може бути врахована введенням у характеристику двигуна першої похідної за часом від $Q(t)$:

$$Q = f(u, x, \dot{x}, T, \dot{Q}) \quad (1.57)$$

або у іншій формі

$$\dot{x} = f(u, x, T, Q, \dot{Q}). \quad (1.58)$$

Параметр T називається постійною часу двигуна, а вирази (1.57) і (1.58) – його **динамічними характеристиками**.

Характеристики виду (1.57), (1.58) для деяких типів двигунів досить добре описують широкий клас динамічних режимів. Для інших типів двигунів вони виявляються придатними для використання тільки в тих випадках, коли узагальнена швидкість \dot{x} змінюється в порівняно вузьких межах. Динамічні режими, що не задовольняють цій умові, вимагають використання більш складних динамічних моделей.

Гідравлічний двигун об'ємного регулювання

Двигун складається з насоса регульованої продуктивності (рис. 1.8) і гідромотора. Вхідним параметром гідромотора є продуктивність насоса W_n яку в першому наближенні можна вважати не залежною від перепаду тисків p_0 [5].

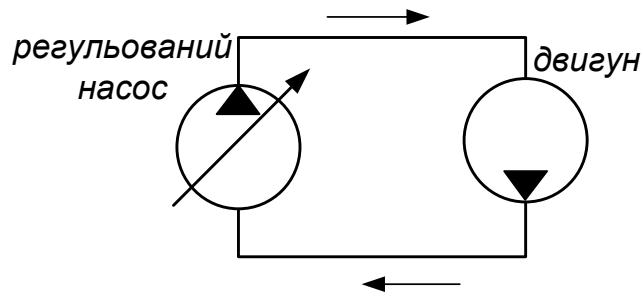


Рис. 1.8. Схема гідравлічного двигуна об'ємного регулювання

При відсутності навантаження ($Q=0$) кутова швидкість гідромотора пропорційна витраті:

$$\dot{x} = \frac{W_H}{k_\partial} \quad (1.59)$$

Рівняння (1.59) – це ідеальна кінематична характеристика; коефіцієнт k_∂ називається характеристичним об'ємом гідромотора. При наявності моменту опору на валу двигуна виникає перепад тисків між входом і виходом гідромотора. При цьому

$$\dot{x} = \frac{W_H}{k_\partial} - \frac{W_H}{g_\partial k_\partial^2} Q, \quad (1.60)$$

де g_∂ - коефіцієнт витоку робочої рідини.

Якщо навантаження змінюється в часі, то механічна характеристика двигуна записується таким чином:

$$\dot{x} = \frac{W_H}{k_\partial} - \frac{W_H}{g_\partial k_\partial^2} Q - \frac{V_0}{E k_\partial^2} \dot{Q}, \quad (1.61)$$

де E - модуль об'ємної пружності робочої рідини; V_0 - внутрішній об'єм трубопроводу високого тиску з підключеними до нього об'ємами насоса та гідромотора. Рівняння (1.61) можна записати в іншому виді:

$$T \dot{Q} + Q = \frac{k_\partial W_H}{g_\partial} - \frac{k_\partial^2}{g_\partial} \dot{x}, \quad (1.62)$$

де T - постійна часу двигуна ($T = \frac{V_0}{E g_\partial}$). Рівняння (1.61) та (1.62) – це динамічні механічні характеристики гідравлічного двигуна об'ємного регулювання.

Гідродвигун із дросельним регулюванням

На рис. 1.9 показана схема найпростішого гідродвигуна із дросельним регулюванням. Тут роль вхідного параметра u виконує положення крана

(заслінки) регульованого дроселя. При зміні площі його прохідного перерізу змінюється витрата рідини через дросель, а отже, міняється швидкість вихідної ланки гідродвигуна. Регулятор тиску підтримує постійним тиск живлення перед дроселем, що створюється насосом. Направляючий гідророзподільник (золотник) здійснює реверсування роторного або поршневого гідромотора.

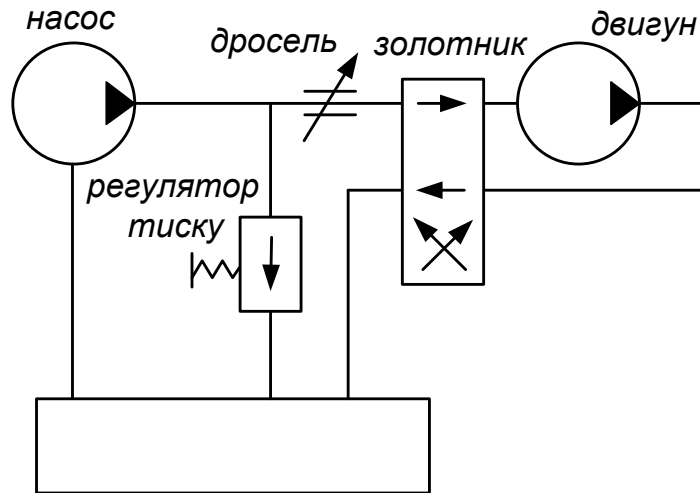


Рис. 1.9. Схема гідродвигуна із дросельним регулюванням

Статична характеристика дросельного гідроприводу записується у вигляді:

$$\dot{x} = \mu f(u) \frac{\sqrt{2}}{k_d \sqrt{\rho}} \sqrt{p_n - \frac{Q}{k_d} - \frac{g_e}{k_d^2} Q}, \quad (1.63)$$

де μ – коефіцієнт витрати для дроселя, який залежить від форми його перерізу; $f(u)$ – залежність площі отвору від вхідного параметра u тобто від положення крана; ρ – об'єм робочої рідини; p_n – тиск на вході у дросель, який вважається постійним.

Для режимів, близьких до статичних ($u = u_0 \approx const$, $Q_0 = Q \approx const$, $\dot{x} = v_0 \approx const$), можна користуватися лінеаризованою динамічною характеристикою:

$$T \frac{d}{dt} (Q - Q_0) + Q - Q_0 = r(u - u_0) - s(\dot{x} - v_0), \quad (1.64)$$

де Q_0 , u_0 , v_0 – відповідно момент на валу двигуна, положення заслінки дроселя та швидкість двигуна, в околі яких здійснена лінеаризація; T – постійна часу двигуна, яка визначається за формулою

$$T = \frac{\sqrt{2}V_0}{E \mu f(u_0)} \sqrt{\rho \left(p_n - \frac{Q_0}{k_\partial} \right)}; \quad r \text{ та } s - \text{ коефіцієнти, які визначають за}$$

$$\text{формулами: } r = 2k_\partial \frac{df}{du} \frac{u_0 \left(p_n - \frac{Q_0}{k_\partial} \right)}{f(u_0)}, \quad s = \frac{\sqrt{2}k_\partial^2}{\mu f(u_0)} \sqrt{\rho \left(p_n - \frac{Q_0}{k_\partial} \right)}.$$

Характеристика (1.64) справедлива при значенні сили, що не перевищує деякого граничного значення тиску, обумовленого налаштуванням регулятора. Це граничне значення слабо залежить від \dot{x} . В цілому статичні робочі характеристики мають форму, показану на рис. 1.10, де ділянка ВС відповідає формулі (1.63), а ділянка АВ визначається налаштуванням регулятора тиску.

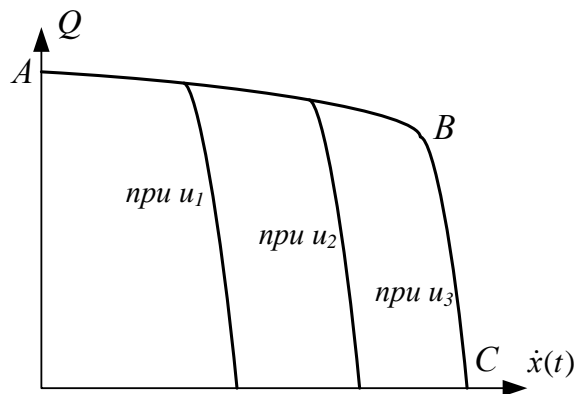


Рис. 1.10. Сімейство статичних характеристик двигуна із дросельним регулюванням

Пневматичний двигун

У пневматичних двигунах у якості робочого тіла звичайно використовують стиснене повітря. Найчастіше пневматичні приводи використовують у якості силових: вони забезпечують прикладення до виконавчого органа (наприклад, поршня) заданої сили, величина якої визначається тиском у робочій камері циліндра. На рис. 1.11 схематично показано найпростіший поршневий пневмодвигун із однією робочою камерою. Вхідним параметром є координата органа (золотника, заслінки), який керує надходженням стисненого повітря в робочу камеру.

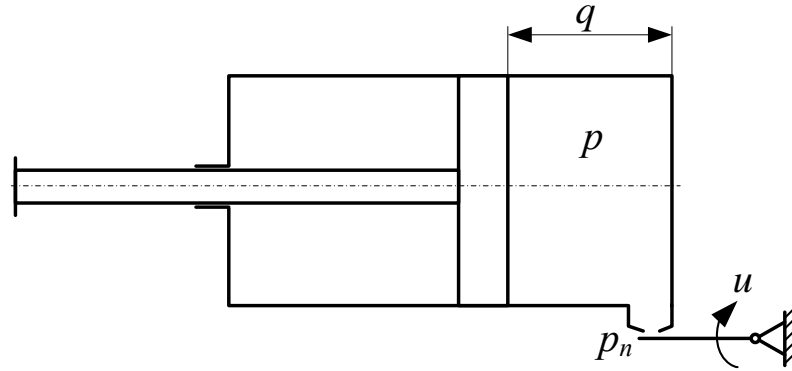


Рис. 1.11. Схема поршневого пневмодвигуна

Механічні характеристики пневматичного двигуна є нелінійними. Якщо прийняти певні припущення, щодо характеру термодинамічних процесів, що відбуваються при заповненні камери, можна одержати вираз лінеаризованої динамічної характеристики пневматичного двигуна, який з точністю до коефіцієнтів збігається з формулою (1.64). Коефіцієнти для динамічної механічної характеристики пневмодвигуна, які входять у вираз (1.64) визначаються так:

$$\begin{cases} T = \frac{S h_0 \mu g}{R \tau} \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_0; \\ r = -S \left(\frac{\partial G}{\partial u} \right)_0 \left[\left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_0 \right]^{-1}; \\ s = -\frac{S^2 p_0 \mu g}{R \tau} \left[\left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_0 \right]^{-1}, \end{cases} \quad (1.65)$$

де S – площа поршня; R – універсальна газова стала; τ – абсолютна температура; p – тиск у робочій камері; h_0 – швидкість руху поршня двигуна, в околі якої лінеаризована механічна характеристика; μ – коефіцієнт витрати, величина якого залежить від конструкції дроселя і може змінюватись від 0,75

до 0,9; $\left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_0$ та $\left(\frac{\partial G}{\partial u} \right)_0$ визначаються при $u=u_0$ та $p=p_0$ із формули:

$$G = \mu f(u) g \sqrt{2 p_n \rho_n F(p/p_n)}, \quad (1.66)$$

де p_n – тиск живлення; залежність $F(p/p_n)$ визначається за формулою:

$$F(p/p_n) = \begin{cases} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p}{p_n} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_n} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right], & \text{при } \frac{p}{p_n} > 0,528 \text{ (докритична течія повітря)}, \\ \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}, & \text{при } \frac{p}{p_n} \leq 0,528 \text{ (надкритична течія повітря)}, \end{cases} \quad (1.87)$$

де k - відношення теплоємкості при постійному тиску до теплоємкості при постійному об'ємі (для повітря $k=1,4$).

Електродвигун постійного струму

До переваг електроприводу можна віднести те, що для нього джерелом енергії слугує мережа постійного або змінного струму. Відсутня необхідність у використанні трубопроводів, а також проблема забруднення навколишнього середовища. Велика кількість машин обладнана електродвигунами постійного струму, на виході котрого крутний момент пропорційний силі струму на вході двигуна. У такому електродвигуні подача струму до ротора здійснюється через щітки, котрі доволі легко можна пошкодити і тому вони вимагають необхідної уваги при обслуговуванні [7].

Принцип дії двигуна постійного струму ілюструє рис. 1.12, він полягає у взаємодії магнітних полів полюсів статора і провідників ротора, по яких протікає струм.

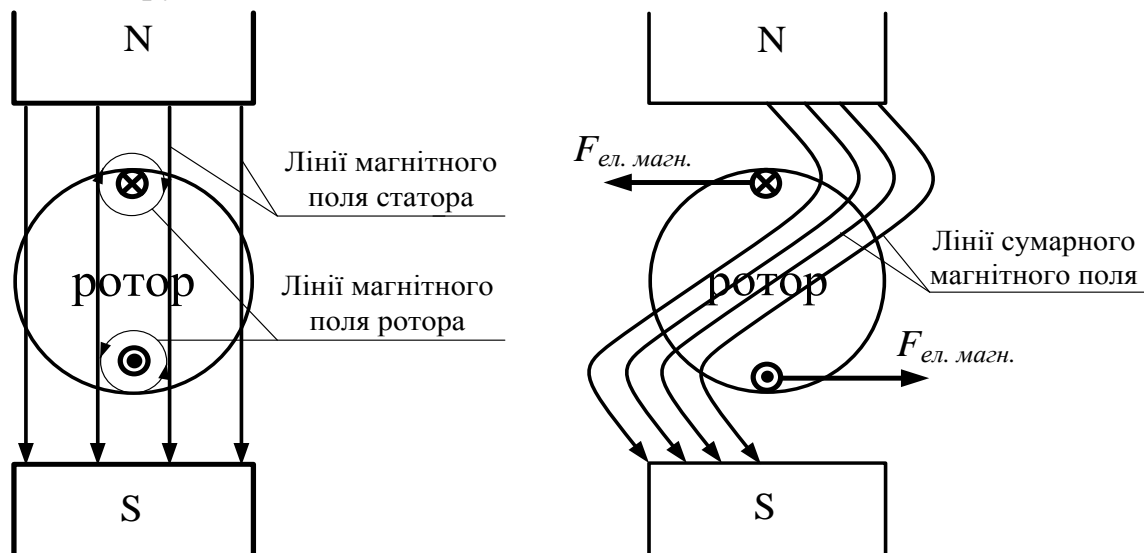


Рис. 1.12. Принцип виникнення електромагнітного моменту у двигуні постійного струму

Якщо струм у провіднику йде від нас (на рис. 1.12 провідник по якому струм йде від нас позначений колом із хрестиком), то, за правилом гвинта,

магнітні силові лінії навколо провідника спрямовані за годинниковою стрілкою. У результаті додавання магнітних полів полюсів і провідника підсилиться магнітне поле праворуч від провідника ротора й послабиться ліворуч від нього. До провідника буде прикладена сила, яка виштовхує його убік ослабленого магнітного поля, тобто вліво. Аналогічні процеси відбуваються з провідником, який знаходиться над південним полюсом статора (цей провідник показано колом із точкою – струм по ньому йде до нас).

На рис. 1.13 показано схему вмикання електричного двигуна постійного струму із незалежним збудженням. Електромагнітний момент, що виникає у двигуні виражається формулою:

$$M = k\Phi \cdot I_{рот} = k'I_{коло збудж} \cdot I_{рот}, \quad (1.68)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора двигуна; k' – коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора та статора двигуна; Φ – магнітний потік двигуна; $I_{рот}$ – струм обмотки ротора; $I_{коло збудж}$ – струм кола збудження двигуна.

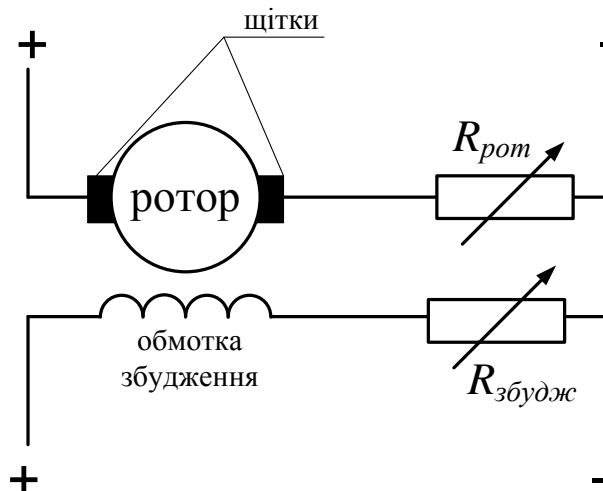


Рис. 1.13. Електрична схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження

Статична механічна характеристика двигуна постійного струму має вигляд:

$$\dot{x} = \frac{U}{k\Phi} - Q \frac{R_{я} + R_{рот}}{k^2 \Phi^2}, \quad (1.69)$$

де U – напруга живлення двигуна; $R_{я}$ і $R_{рот}$ – відповідно опори якоря та додаткового реостату включеного в коло якоря.

Якщо врахувати електромагнітну інерційність електричного двигуна, то можна отримати його динамічну механічну характеристику:

$$T\dot{Q} + Q = \beta \left(\frac{U}{k\Phi} - \dot{x} \right), \quad (1.70)$$

де β – жорсткість механічної характеристики ($\beta = \frac{k^2\Phi^4}{R_{я} + R_{ром}}$); T – електромеханічна стала часу двигуна ($T = \frac{L_{я}}{R_{я} + R_{ром}}$); $L_{я}$ – індуктивність якірного електричного кола двигуна.

Електропривод змінного струму

Значна частина машин та механізмів обладнана асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором. У пазах статора розміщена обмотка, що утворює фазні зони, зсунуті в просторі на 120 електричних градусів. При підключенні обмотки статора до трифазної мережі, напруги фаз якої зсунуті на 120°, виникає магнітне поле, що обертається у статорі з кутовою швидкістю:

$$\dot{x}_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (1.71)$$

де \dot{x}_0 – швидкість ідеального холостого ходу двигуна; f_1 – частота мережі; p – число пар полюсів. У пазах короткозамкненого ротора закладені металеві стержні (обмотка ротора), з'єднані по кінцях, вони утворюють „білячу клітку”. При обертанні ротора зі швидкістю поля $\dot{x} = \dot{x}_0$ (ідеальний холостий хід) у його стержнях не наводиться ЕРС, не протікає струм, не створюється електромагнітний момент. Прикладена до обмоток напруга, врівноважується ЕРС самоіндукції. Якщо на вал двигуна прикласти зовнішній момент навантаження Q_c ротор починає відставати від обертового поля статора, тобто $\dot{x} \neq \dot{x}_0$, у його стержнях наводиться ЕРС і протікає струм, що, взаємодіючи з магнітним полем статора, створює електромагнітний момент Q , який врівноважує момент навантаження Q_c [8].

Механічна характеристика асинхронного двигуна є нелінійною, вона описується рівнянням Клосса [7]:

$$Q = \frac{2M_{\max}(1 + s_{кр}a)}{\frac{\dot{x}_0 - \dot{x}}{s_{кр}\dot{x}_0} + \frac{s_{кр}\dot{x}_0}{\dot{x}_0 - \dot{x}} + 2s_{кр}a}, \quad (1.72)$$

де M_{\max} – максимальний момент двигуна; $s_{кр}$ – критичне ковзання, при якому настає максимальний момент; a – безрозмірний параметр ($a = \frac{R_1}{R'_2}$);

R_1 , R'_2 – активний опір статора та приведений до статора опір ротора відповідно. Якщо потужність двигуна більше 5 кВт, то можна прийняти $R_1 \approx 0$ і рівняння (1.72) спрощується:

$$Q = \frac{2M_{\max}}{\frac{\dot{x}_0 - \dot{x}}{s_{кр}\dot{x}_0} + \frac{s_{кр}\dot{x}_0}{\dot{x}_0 - \dot{x}}}. \quad (1.73)$$

На рис. 1.14. суцільною лінією показана механічна характеристика асинхронного двигуна. Штрихова лінія показує провал моменту при ковзанні $s \approx 0,85$ (це мінімальний момент двигуна). Виникнення провалу функції моменту на графіку (рис. 1.14) є наслідком впливу моментів створених вищими непарними гармоніками в магнітному полі обмоток. Якщо прийняти припущення, що двигун працює на лінійній ділянці механічної характеристики, тобто $\dot{x}_0 \geq \dot{x} \geq \dot{x}_0(1 - s_{кр})$, то можна записати динамічну механічну характеристику асинхронного двигуна, яка співпадає із аналогічною характеристикою двигуна постійного струму з точністю до коефіцієнтів (для асинхронного двигуна справедливі такі рівності

$$T = \frac{1}{2\pi f_1 s_{кр}}, \quad \beta = \frac{2M_{\max} p}{2\pi f_1 s_{кр}}).$$

Зображена на рис. 1.14 механічна характеристика є статичною оскільки вона не враховує коливання моменту, які виникають під час електромагнітних перехідних процесів у двигуні. Для того, щоб врахувати електромагнітні перехідні процеси необхідно розглянути математичну модель асинхронного двигуна, на основі якої можна побудувати динамічну механічну характеристику двигуна.

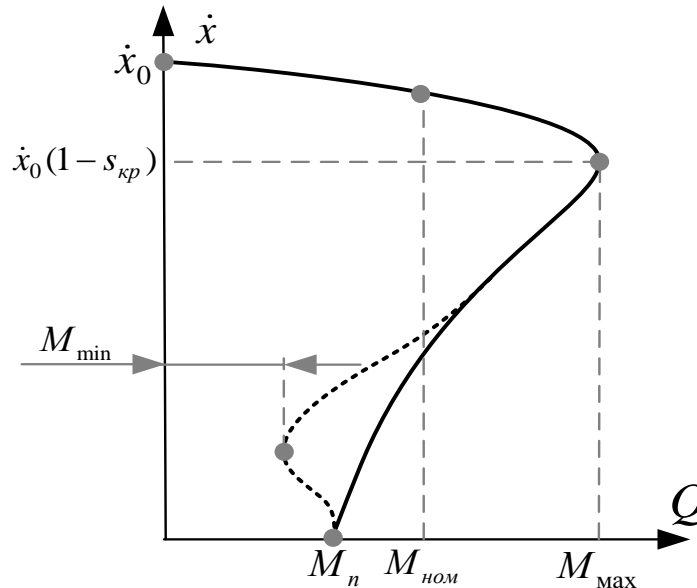


Рис. 1.14. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Диференціальні рівняння, які описують асинхронний двигун у формі рівнянь Коші представляються у такому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{1u}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1\delta}\psi_{1u} + \frac{R_1L_m}{L_1L_2\delta}\psi_{2u} + 2\pi f_1\psi_{1v} + U_1; \\ \frac{d\psi_{1v}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1\delta}\psi_{1v} + \frac{R_1L_m}{L_1L_2\delta}\psi_{2v} - 2\pi f_1\psi_{1u}; \\ \frac{d\psi_{2u}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2\delta}\psi_{2u} + \frac{R_2L_m}{L_1L_2\delta}\psi_{2u} + (2\pi f_1 - \dot{x})\psi_{2v}; \\ \frac{d\psi_{2v}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2\delta}\psi_{2v} + \frac{R_2L_m}{L_1L_2\delta}\psi_{1u} - (2\pi f_1 - \dot{x})\psi_{2u}; \\ Q = \frac{3}{2}p \frac{L_m}{L_1L_2\delta}(\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v}), \end{array} \right. \quad (1.74)$$

де ψ_{1u}, ψ_{1v} – потікозчеплення статора у координатах $(u-v)$; ψ_{2u}, ψ_{2v} – потікозчеплення ротора у координатах $(u-v)$; R_1, R_2 – активний опір статора та приведений до статора опір ротора; L_1, L_2 – індуктивності статорної та роторної обмоток; L_m – взаємоіндукція; δ – коефіцієнт розсіювання; U_1 – напруга, яка підводиться до статора двигуна. На основі системи рівнянь (1.74) побудовано динамічну механічну характеристику асинхронного двигуна (рис. 1.15).

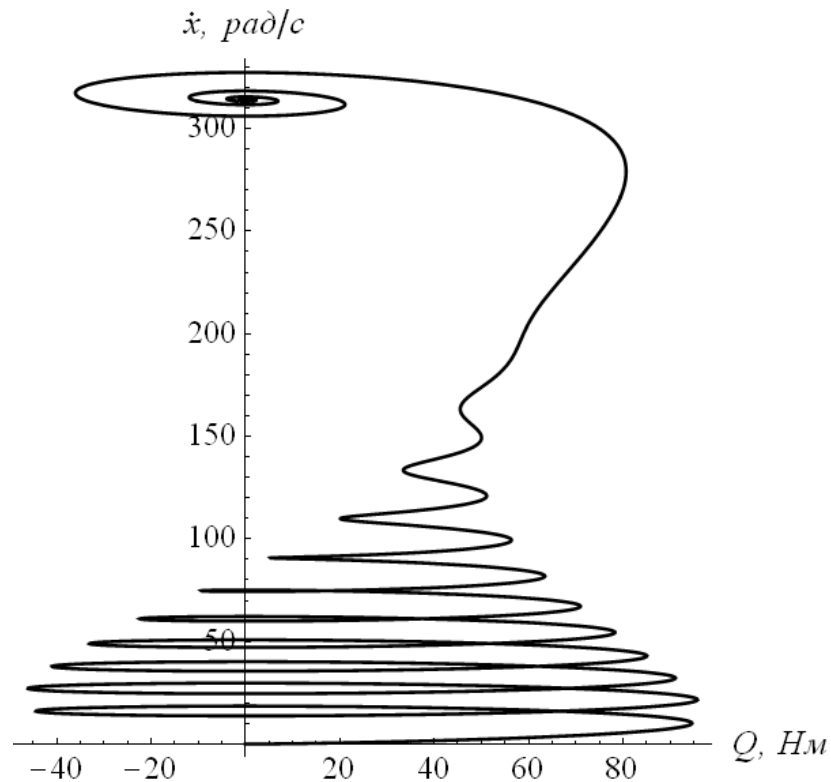


Рис. 1.15. Динамічна механічна характеристика асинхронного двигуна

Сили опору робочих машин

Виконання робочих процесів завжди супроводжується виникненням робочих навантажень – активних сил, що діють на робочі органи машини. Вивчаючи властивості робочих процесів, можна виявити залежності між величиною робочого навантаження і кінематичними параметрами, що визначають координати, швидкості та прискорення точок робочих органів, а в ряді випадків і явну залежність сили від часу. Відповідна функція

$$P_{on} = f(t, x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (1.75)$$

називається **характеристикою робочого процесу**.

Відзначимо, що залежність робочих навантажень від прискорень робочих органів машини виникає в тих випадках, коли машина виконує транспортні операції або коли технологічний процес, що виконується машиною, пов'язаний з переміщенням оброблюваної сировини (наприклад, переміщенням).

Вивчення робочих процесів і їх характеристик є завданням відповідних спеціальних наукових дисциплін і виходить за рамки загальної теорії динаміки машин. Так, характеристики сил різання, що виникають при обробці металів на верстатах, вивчаються в теорії різання, характеристики сил, що діють на ротор генератора – у теорії електричних машин,

характеристики сил, що діють на поршень компресора – у теорії пневматичних систем тощо. Тому тут обмежимося розглядом лише деяких характерних прикладів.

1. Постійна сила опору. Активною силою, що діє на робочий орган підйомника є сила ваги вантажу, що піднімається. Ця сила не залежить ні від швидкості підйому, ні від положення вантажу, ні від часу, тобто вона завжди залишається постійною протягом усього процесу підйому. Таким чином, у цьому випадку

$$P_{on} = const. \quad (1.76)$$

Таку характеристику робочого процесу мають механізми підйому вантажу та переміщення вантажопідйомних кранів, ліфти, лебідки тощо.

2. Сила (момент) опору лінійно залежить від швидкості. На рис. 1.16 показана схема підключення генератора постійного струму, який працює на незмінне зовнішнє електричне навантаження $R_{нав}$. Момент опору на валу генератора прямопропорційний швидкості його обертання:

$$M_{on} = \frac{(R_{я} + R_{нав})}{k^2 \Phi^2} \omega \cdot sign(\omega), \quad (1.77)$$

$sign(\omega)$ - сінгум-функція (функція знаку), яка враховує напрямок обертання робочої машини.

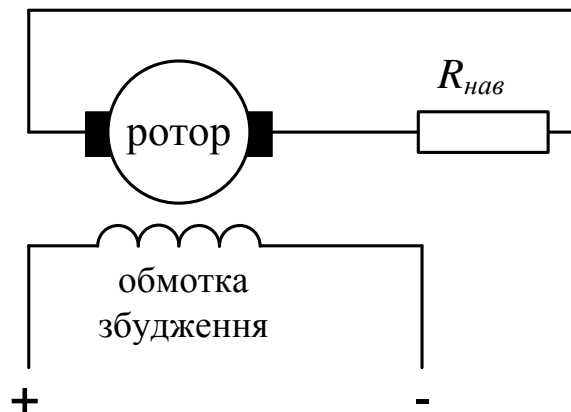


Рис. 1.16. Схема підключення генератора постійного струму

3. Сила (момент) опору квадратично залежить від швидкості. Активні сили, що діють на ротор обертового вентилятора, мають аеродинамічне походження. Отже, момент опору вентилятора залежить від кутової швидкості ротора. В аналітичній формі ця залежність може бути приблизно представлена в наступному виді:

$$M_{on} = a\omega^2 \text{sign}(\omega), \quad (1.78)$$

де a - коефіцієнт; ω - кутова швидкість вентилятора. Характеристику (1.78) мають відцентрові насоси, гребні гвинти та інші машини.

4. Сила (момент) опору оберненопропорційно залежить від швидкості. Для деяких металообробних верстатів (токарних, розточних, фрезерних та інших) споживана потужність під час зміни швидкості їх обертання залишається постійною. У цьому випадку момент опору робочої машини можна представити такою формулою:

$$M_{on} = \frac{N_{спож}}{\omega} \text{sign}(\omega), \quad (1.79)$$

де $N_{спож}$ - споживана робочою машиною потужність ($N_{спож} = const$).

У формулах (1.77)-(1.79) множник $\text{sign}(\omega)$ показує, що при зміні напрямку обертання робочої машини момент опору на її валу також змінює свій знак.

5. Сила (момент) опору залежна від положення. Розглянемо робочий процес, що відбувається в циліндрі поршневого компресора (рис. 1.17, а). Тут робочий орган – поршень 1 робить зворотно-поступальний рух. При його робочому ході (вправо) повітря в циліндрі стискується, тиск росте до тих пір, поки не відкривається випускний клапан 2. Потім починається витікання повітря через клапан, при якому тиск у камері залишається близьким до постійного. При зворотному ході відбувається засмоктування повітря через випускний клапан 3; при цьому тиск у циліндрі стає трохи нижчим за атмосферний. Приблизна форма індикаторної діаграми компресора, що виражає залежність тиску, а отже, і активної сили P_{on} , яка рівна добутку тиску на площу поршня, від координати x , показана на рис. 1.17, б.

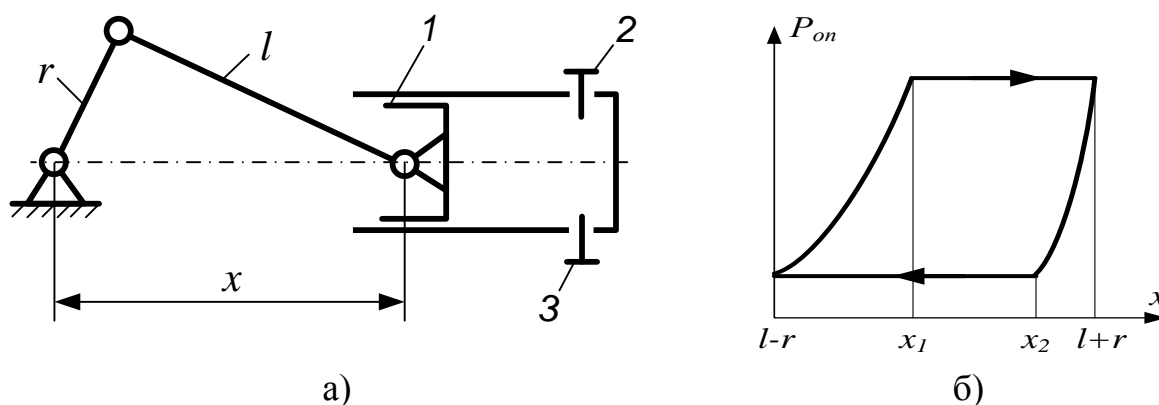


Рис. 1.17. Схема поршневого компресора (а) та його індикаторна діаграма (б)

У ряді машин вплив сил робочого процесу на робочі органи машини є короткочасним і здійснюється лише на малій ділянці траєкторії робочого органа. Це має місце, наприклад, у кувальних пресах, відбійних молотках, машинах для забивання палів тощо. Робочі процеси такого роду називають ударними або імпульсними. Типова характеристика ударного процесу для штампувального верстату показана на рис. 1.18 (тут x_{\max} - максимальне переміщення робочого органа; Δ - положення робочого органа, при якому виникає ударне навантаження).

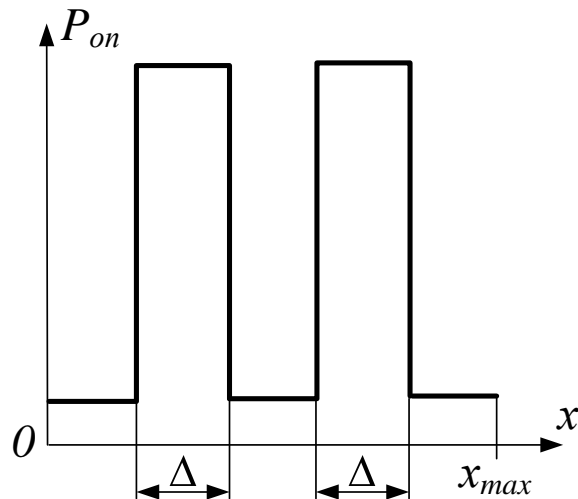


Рис. 1.18. Робоча характеристика штампувального верстату

Для обох механізмів (компресора та штампувального верстату) справедливою є рівність:

$$P_{on} = f(x). \quad (1.80)$$

У всіх розглянутих прикладах сили (моменти) опору є постійними або залежать від швидкості або координати робочого органа машини. Явна залежність характеристик робочих процесів від часу й прискорень робочих органів зустрічається порівняно рідко.