

2. ОСНОВИ МЕХАНІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Рівняння руху

Розглянемо найпростішу механічну систему, що складається з ротора двигуна і безпосередньо пов'язаного з ним навантаження – робочого органу машини (рис. 2.1.). Незважаючи на простоту, система цілком реальна: саме так реалізована механічна частина ряду насосів, вентиляторів і багатьох інших машин. До такої моделі може бути зведена механічна частина більшості електроприводів, розглянутих у курсі.

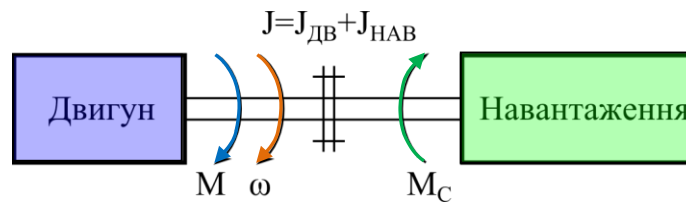


Рис. 2.1. Модель механічної частини

У системі на рис. 2.1 діють два моменти – електромагнітний момент M , що розвивається двигуном, і сумарний момент сил опору M_c , створюваний навантаженням і втратами енергії на тертя в механічній частині робочої машини. Кожний момент має свою величину і напрямок, а рух системи визначається другим законом Ньютона:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.1)$$

де ω – кутова швидкість,

J – еквівалентний момент інерції.

Права частина рівняння (2.1) називається *динамічним моментом*

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{дин}. \quad (2.2)$$

Він виникає, якщо алгебраїчна сума моментів M і M_c відмінна від нуля. Величина і знак динамічного моменту визначають *прискорення*.

Режими, при яких $M_{дин} = 0$, тобто моменти M і M_c дорівнюють одне одному за величиною і протилежні за напрямком дії, називають *сталими* або *статичними*. Їм відповідає $\omega = const$ і в тому числі $\omega = 0$.

Режими, коли $M_{дин} \neq 0$, називають *перехідними* або *динамічними* (прискорення, уповільнення).

Момент M_c у рівнянні (2.1) практично повністю визначається властивостями навантаження, а момент M створюється електродвигуном. У результаті,

механічний процес, тобто залежність швидкості від часу $\omega(t)$ в динамічних режимах визначається розв'язанням диференціального рівняння (2.1), а в статичних режимах знаходиться з умови

$$\pm M(\omega) \pm M_c(\omega) = 0.$$

2.2. Приведення моментів опору і моментів інерції

Зазвичай між двигуном і навантаженням розташована яка-небудь механічна передача **ПМ** (рис. 1.1), тобто використовують кілька різних валів зі своїми моментами та швидкостями. Для зведення будь-якої реальної системи до найпростішої моделі (рис. 2.1) потрібно виконати низку операцій, названих *приведенням* моментів і моментів інерції до деякого, обраного в якості основного, валу. Зазвичай – до валу двигуна. Іншими словами, деяку реальну механічну систему, наприклад, показану на рис. 2.2,а, потрібно замінити еквівалентною системою (рис. 2.2,б), так, щоб ця заміна не відбилася на стані двигуна (чи частині системи, яка лишилась незмінною).

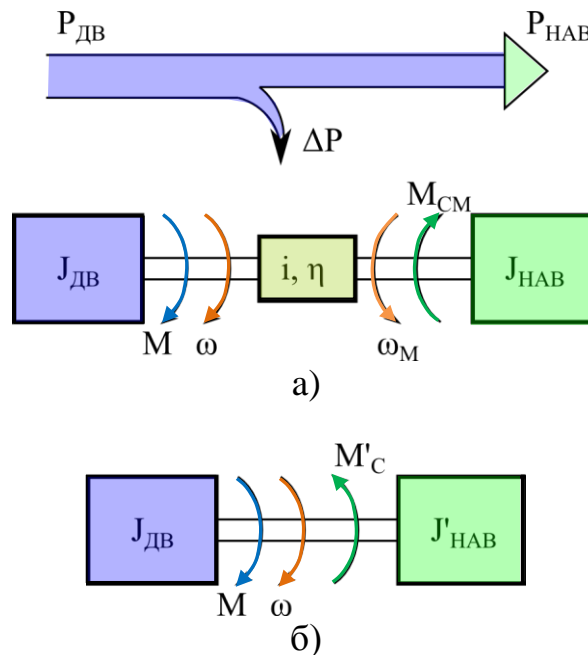


Рис. 2.2. До приведення $M_{см}$ і $J_{наб}$ до валу двигуна

Прийmemo наступні припущення:

- * система жорстка, без зазорів;
- * моменти інерції, що відносяться до основних валів – незмінні, а що відносяться до проміжних валів (якщо такі є) – дорівнюють нулю;
- * передатне відношення редуктора $i = \omega / \omega_M$ і ККД передачі η – постійні.

Приведення моментів сил опору виконуються з умови рівності потужностей

у вихідній і еквівалентній системах.

Нехай потужність, що розвивається, дорівнює добутку $M\omega$, а втрати потужності покриваються двигуном (M і ω спрямовані згідно). Тоді при постійному значенні ω ($M=M_C$) потужність, необхідна для подолання сил опору механізму $P_{\text{мех}}$, повинна бути рівною еквівалентній потужності $P_{\text{екв}}$:

$$P_{\text{мех}} = \frac{M_{CM} \cdot \omega_M}{\eta} = P_{\text{екв}} = M_C \omega, \quad (2.2)$$

звідки

$$M_C = \frac{M_{CM}}{i \cdot \eta}. \quad (2.3)$$

Втрати потужності завжди покриваються тією частиною системи, що створює рух, тому при зворотному потоці потужності – від навантаження до двигуна

$$M_C = \frac{M_{CM} \cdot \eta}{i}. \quad (2.4)$$

З метою спрощення рівняння (2.4) у ньому не враховані втрати в передачах. Це не приводить до великих похибок, якщо динамічні режими не відіграють визначальну роль у роботі привода.

Рівність запасів кінетичної енергії в реальній A_p і приведеній $A_{\text{прив}}$ системах

$$A_p = \frac{J_{\text{дв}} \omega^2}{2} + \frac{J_{\text{нав}} M}{2} = A_{\text{прив}} = \frac{J \omega^2}{2}, \quad (2.5)$$

дозволяє визначити приведений момент інерції

$$J = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{нав}}}{i^2}. \quad (2.6)$$

2.3. Механічні характеристики

Моменти M і M_C можуть залежати від часу, положення, швидкості. Найцікавіший та важливий зв'язок моментів M і M_C зі швидкістю ω . Залежності $\omega(M)$ і $\omega(M_C)$ називають *механічними характеристиками* відповідно *двигуна* та *навантаження (механізму)*. Механічні характеристики слугують зручним і корисним інструментом при аналізі статичних і динамічних режимів

електропривода.

Моменти та швидкість можуть мати різні знаки. Тому механічні характеристики можуть розташовуватися в чотирьох квадрантах площини $\omega - M$. На рис. 2.3, як приклад, наведені характеристики асинхронного двигуна $M(\omega)$ і відцентрової машини $M_C(\omega)$. Знаки величин визначають прийнявши один з напрямків руху за позитивний. Наприклад “+” при русі за годинниковою стрілкою або вгору (підйом). Моменти, спрямовані за напрямом руху (які збільшують модуль швидкості), мають знак, що збігається зі знаком швидкості (ділянка “ $\omega_0, 0 - 0, M_{кз}$ ” характеристики двигуна). Моменти, спрямовані проти напрямку руху (гальмівні), мають знак, протилежний знаку швидкості (решта ділянок характеристик).

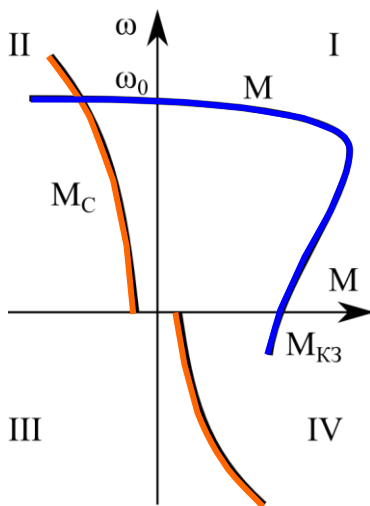


Рис. 2.3. Приклад механічних характеристик

Моменти прийнято ділити на активні та реактивні.

Активні моменти можуть бути як рушійними, так і гальмівними. Їхній напрямок дії залежить від напрямку руху. Наприклад, момент, створений електричною машиною (M на рис. 2.3), або момент, створений вантажем, пружиною тощо. Відповідні механічні характеристики можуть розташовуватися в кожному із чотирьох квадрантів.

Реактивні моменти – це реакція на рух. Вони завжди спрямовані проти руху, тобто завжди гальмівні. Наприклад, момент від сил тертя, момент, створений відцентровою машиною тощо. Механічні характеристики таких робочих машин завжди розташовуються в другому та четвертому квадрантах.

Механічні характеристики прийнято оцінювати їхньою *жорсткістю* $\beta = \frac{dM}{d\omega}$. Вони бувають (рис. 2.4) абсолютно жорсткими $\beta = \infty$ (1), абсолютно м'якими $\beta = 0$ (2) можуть мати негативну $\beta < 0$ (3) або позитивну $\beta > 0$ (4) жорсткість.

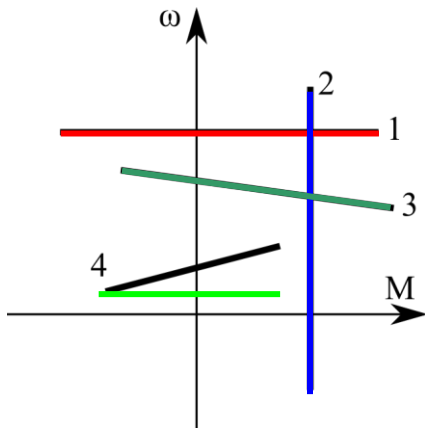


Рис. 2.4. Механічні характеристики з різною жорсткістю

Характеристики двигуна і навантаження, якщо їх розглядати спільно, дозволяють дуже просто визначити такі координати, як швидкість і момент у сталому (статичному) режимі ($\omega_{уст}$, $M_{уст}$). Дійсно, якщо дзеркально відобразити відносно вісі швидкості характеристику $M_C(\omega)$ (рис. 2.5,а), то точка A перетину відображеної кривої $-M_C(\omega)$ (відрізки AB і BC рівні) з характеристикою двигуна $M(\omega)$ визначить сталий режим, оскільки виконається умова $M+(-M_C)=0$.

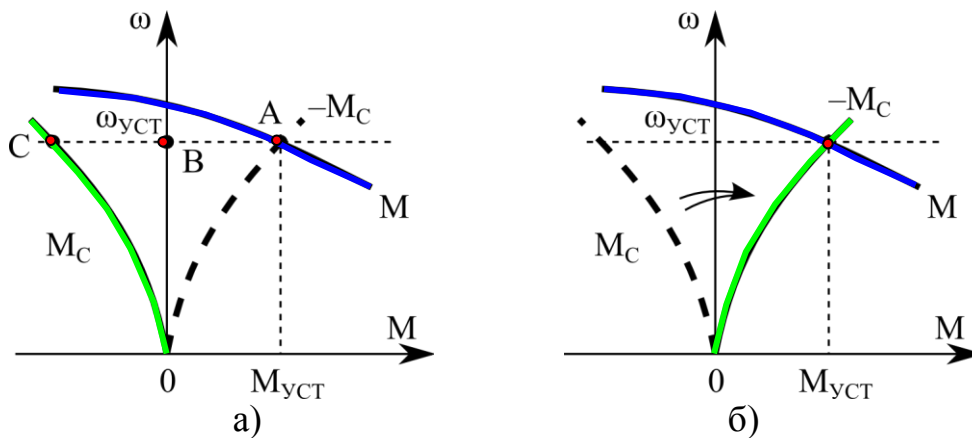


Рис. 2.5. До визначення сталого режиму

Тут виконана операція переносу M_C із другого квадранта в перший. Цю операцію можна виключити, якщо записувати рівняння руху (2.1) у вигляді:

$$\pm M - (\pm M_C) = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.7)$$

де знак “-” перед $\pm M_C$ означає дзеркальний перенос характеристики навантаження (рис. 2.5,б). Такий прийом традиційно використовується в електроприводі, де замість запису (2.1) використовують змінену форму (2.7), пам'ятаючи, що це лише зручний прийом, при якому сталий режим виходить при простому перетинанні характеристики M та $-M_C$.

Механічні характеристики двигуна та навантаження дозволяють визначити чи буде сталий режим стійким, тобто чи повернеться система після випадкового збурення до вихідного стану – рис. 2.6,а або не повернеться – рис. 2.6,б.

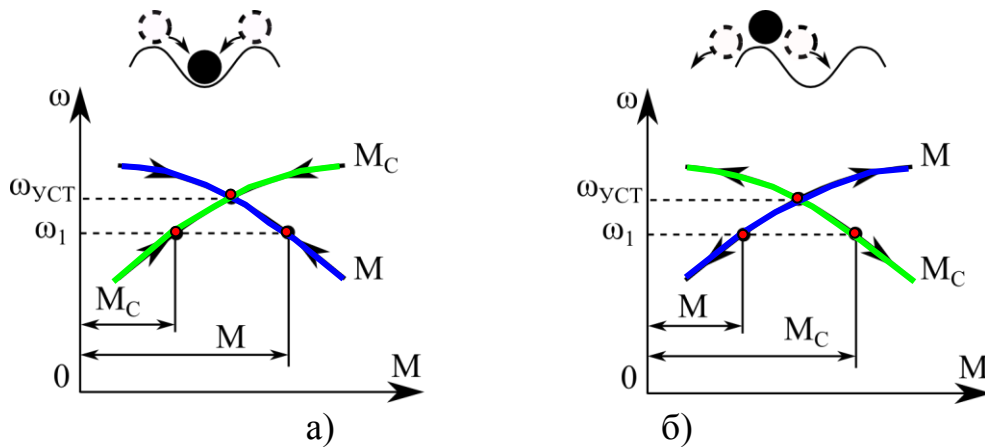


Рис. 2.6. До визначення статичної стійкості

На рис. 2.6,а показано, що будь-яке випадкове зниження швидкості (наприклад, $\omega_1 < \omega_{уст}$) супроводжується перевагою рушійного моменту M над гальмівним M_C . У результаті система повертається у вихідний стан і рівновага відновлюється. Система статично стійка. У другому випадку (рис. 2.6,б) така ж випадкова зміна швидкості призводить до переваги гальмівного моменту і рівновага не відновлюється. Система статично нестійка.

2.4. Регулювання координат електропривода

Як відзначалося вище, основна функція електропривода полягає в керуванні його координатами – швидкістю та моментом. Тобто в їх примусовій спрямованій зміні відповідно до вимог технологічного процесу, що обслуговується.

Регулювання швидкості або моменту – це примусова зміна цих величин відповідно до вимог технологічного процесу за допомогою впливу на механічну характеристику двигуна. Окремим випадком регулювання є підтримка однієї з координат на необхідному рівні при незалежній зміні іншої координати.

Частіш за інших регульованою координатою служить швидкість. Наприклад, необхідно змінювати швидкість транспортного засобу залежно від умов руху і стану дороги або необхідно регулювати швидкість насоса для забезпечення потрібного напору в системі водопостачання, потрібно підтримувати на заданому рівні швидкість руху жили кабеля в процесі накладення на неї ізоляції тощо.

Поняття “*регулювання швидкості*”, коли використовуються різні характеристики (рис. 2.7,а), не слід змішувати зі зміною швидкості, яке виникає внаслідок зростання або зниження навантаження та здійснюється відповідно до форми даної механічної характеристики (рис. 2.7,б).

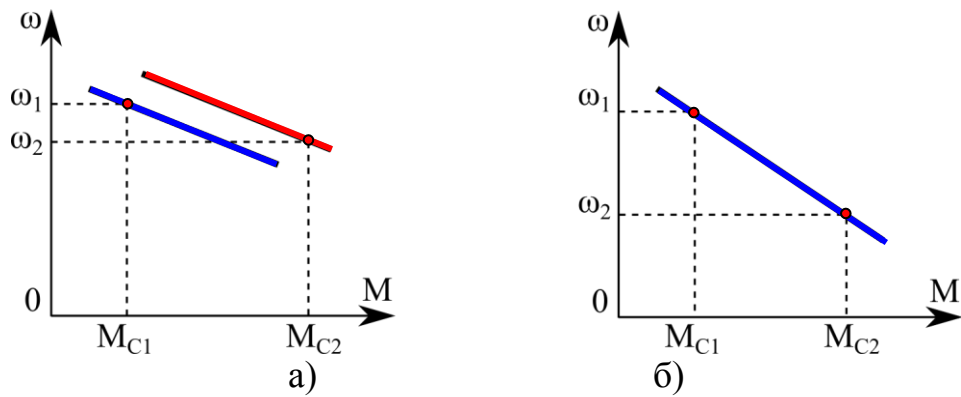


Рис. 2.7. Регулювання (а) і зміна (б) швидкості

У деяких випадках може виникати необхідність регулювання моменту. Наприклад, якщо потрібно якісно укладати на котушку дріт, який отримують з волочильного стана, або при буксируванні судна на великих хвилях забезпечити відсутність обриву троса тощо.

Оскільки регулювання швидкості пов'язане зі спрямованим формуванням механічних характеристик, то для розуміння напряму регулювання виділяють одну з них у якості *основної*. Зазвичай – це *природна характеристика* двигуна, що відповідає номінальним значенням величин, що її визначають (напруга, частота, магнітний потік тощо). Всі інші характеристики, створені з метою регулювання швидкості, називаються *штучними*. Вони можуть формуватися різними способами, що відрізняються як за технічними, так і за економічними показниками:

1. **Напрямок регулювання.** Якщо штучні характеристики розташовані тільки нижче природної, то це – *однозонне регулювання вниз* від основної швидкості, тільки вище природної – *однозонне регулювання вгору* від основної швидкості. Якщо характеристики розташовуються як вище, так і нижче природної – *двозонне регулювання*.

2. **Діапазон регулювання** – це відношення максимальної можливої швидкості до мінімальної $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ при заданих змінах моменту навантаження – рис. 2.8.

Легко бачити, що однаковим природним характеристикам і змінам моменту ΔM_C можуть відповідати різні діапазони регулювання, що пов'язано із жорсткістю штучних характеристик.

Із жорсткістю характеристик зв'язаний також ще один показник – *стабільність швидкості* на штучних характеристиках. Вона може бути низька, як на м'якій штучній характеристиці рис. 2.8,а або висока (на жорсткій штучній характеристиці рис. 2.8,б). Іноді потрібна абсолютно жорстка характеристика при $\beta = \infty$. Іноді, навпаки, потрібні дуже м'які характеристики (регулювання моменту).

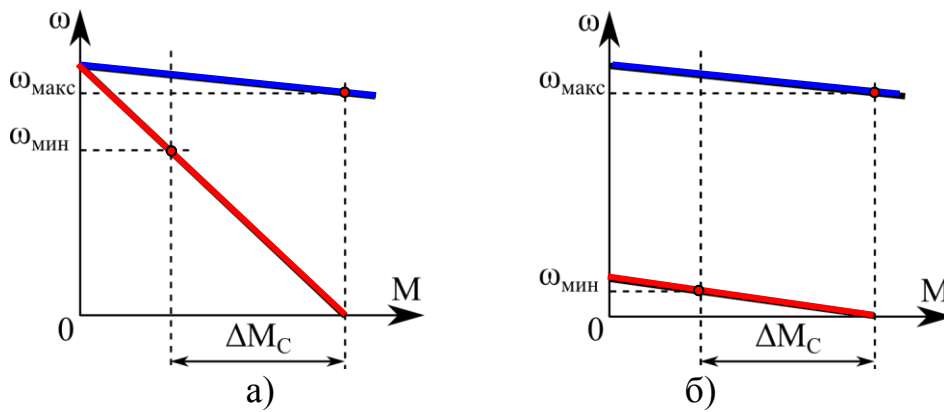


Рис. 2.8. До визначення діапазону регулювання швидкості

3. **Плавність регулювання** – це можливість отримувати штучні характеристики, розташовані як завгодно близько одна до одної. Навпаки, можливість мати лише кілька фіксованих характеристик – це *східчасте регулювання*.

4. **Припустиме навантаження на штучних характеристиках** – дуже важливий показник, що визначає надійність електропривода. Наприклад, *довгостроково припустиме навантаження*, таке що визначається припустимим нагріванням двигуна.

Припустиме навантаження на природній характеристиці – те яке відповідає номінальному моменту двигуна M_H . Не враховуючи зміну тепловіддачі, припустимим струмом у силових колах при будь-якій швидкості є номінальний струм двигуна I_H . Тоді припустимий момент для примусово охолоджуваного двигуна

$$M_{прин} \equiv I_H \Phi \quad (2.8)$$

буде залежати від магнітного потоку двигуна Φ на відповідній штучній характеристиці. При регулюванні з $\Phi = \Phi_H = const$ $M_{прин} \equiv I_H \cdot \Phi_H \equiv M_H$. Груба оцінка (2.8) дає лише загальне уявлення про припустиме навантаження і повинна уточнюватись у кожному конкретному випадку.

5. **Економічність регулювання** оцінюється втратами енергії, що супроводжують той або інший спосіб регулювання. Іноді економічність вдається грубо оцінити, порівнюючи корисну потужність $P_2 = M \cdot \omega$ зі споживаної із мережі P_1 , тобто визначаючи втрати ΔP або обчислюючи ККД η у деякій робочій точці:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (2.9)$$

Значно більш серйозна і переконлива оцінка економічності регулювання

здійснюється порівнянням різних способів, які можуть ґрунтуватися на цикловому ККД $\eta_{ц}$, що визначається з урахуванням конкретних умов роботи привода за час циклу $t_{ц}$:

$$\eta_{ц} = \frac{\int_0^{t_{ц}} P_2(t) dt}{\int_0^{t_{ц}} P_2(t) dt + \int_0^{t_{ц}} \Delta P(t) dt}. \quad (2.10)$$

6. **Витрати на регулювання** можна визначити як вартість додаткового устаткування *Варт.Устат.*, що використовується для здійснення регулювання. Ефективність витрат зручно оцінювати строком їхньої окупності $T_{ок}$.

$$T_{ок} = \frac{\text{Варт.Устат.}}{\text{Річ.Ефф.}}, \quad (2.11)$$

де *Річ.Ефф.* – ціна річного ефекту від використання регулювання.

Наприклад, якщо для нерегульованого електропривода насоса використовується частотно-регульований перетворювач із вартістю 1500 USD, а економічний ефект за рахунок заощадження електроенергії, води та тепла становить 2100 USD/рік, то строк окупності складе

$$T_{ок} = \frac{1500}{2100} \approx 0,7 \text{ року.}$$

Наведені шість показників регулювання дозволяють порівнювати в головних рисах і зіставляти різні способи. Очевидно, що ідеальним був би спосіб, що здійснює плавне двозонне регулювання у широкому діапазоні із приблизно постійним припустимим навантаженням $M_{прин} \approx M_H$, з малими втратами, за низької вартості додаткового устаткування. Очевидно, що такого ідеального способу не існує, і інженерові завжди доводиться шукати деякий розумний компроміс. Останнім часом широко використовується неформалізований, але зручний показник “якість/ціна”. У поняття “якість” входить деяка певним чином організована та погоджена з користувачем сукупність перерахованих вище показників, доповнена такими загальнотехнічними показниками як надійність, ремонтпридатність, перешкодозахищеність, взаємодія з мережею тощо.

Правильно організований і добре обґрунтований інтегральний показник “якість/ціна” – зручний засіб просування нового товару на ринок.

ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Методи приведення моментів навантаження та інерції до валу двигуна.
2. Припущення, які приймаються для приведення моментів навантаження та інерції.
3. Механічні характеристики електропривода. Рушійний та гальмівні режими роботи.
4. Активний та реактивний моменти навантаження.
5. Поняття жорсткості механічної характеристики.
6. Статична стійкість системи електропривода.
7. Поняття регулювання швидкості.
8. Припустимі показники електропривода.
9. Головні показники, якими характеризуються механічні характеристики.
10. Показник економічності регулювання.
11. Показник витрат регулювання.