

## ЕЛЕКТРОПРИВОДИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 1.1. Основні рівняння

Найпростіша модель електропривода постійного струму для сталих (статичних) режимів представлена на схемі рис. 3.1.

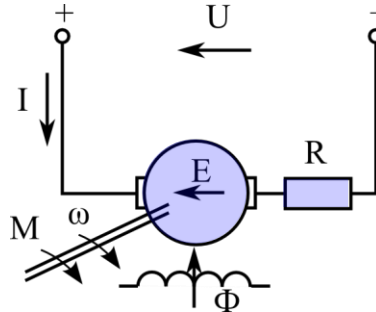


Рис. 3.1. Схема електропривода із двигуном постійного струму

Двигун має два незалежні електричні кола – якоря і обмотки збудження. Якірне коло живиться від незалежного джерела з напругою  $U$ . Опір цього кола  $R$  постійний. Магнітний потік головних полюсів  $\Phi$  визначається лише струмом у незалежному колі збудження і не залежить від навантаження (реакція якоря не проявляється). Індуктивні параметри кіл не враховуються, тому що розглядаються лише сталі (статичні) режими, коли струми цих кіл не змінюються. Взаємодія струму якоря  $I$  з магнітним потоком збудження  $\Phi$  за законом **Ампера** викликає електромагнітну силу, а її дія на дроти якірного кола створює електромагнітний момент:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I, \quad (3.1)$$

де  $k$  – конструктивний параметр машини.

У провідниках обмотки якоря, що рухаються з кутовою швидкістю  $\omega$  в магнітному полі відповідно до закону **Фарадея**, наводиться ЕРС обертання  $E$ :

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega. \quad (3.2)$$

Напрямок  $E$  залежить від напрямку обертання якоря двигуна.

Відповідно до другого закону **Кірхгофа** для якірного кола машини справедливе рівняння електричної рівноваги:

$$U = I \cdot R + E. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.1), (3.2) і (3.3) – найпростіша, але достатня для розуміння головних процесів в електроприводі постійного струму модель. Для розв’язання практичних задач вони повинні бути доповнені рівнянням руху з моментом втрат  $\Delta M$ , що входять в  $M_C$ :

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt} \leftarrow \quad (3.4)$$

і рівняннями кола збудження для конкретної схеми електропривода.

Зрозуміло, що в умовах кожного завдання повинно бути строго обговореним те, що задано та відомо, а що потрібно шукати.

Розглянемо докладніше роль ЕРС  $E$  у процесі перетворення енергії, що здійснює електрична машина. Нехай існував деякий сталий режим  $M_1 = M_{C1}$ , а потім  $M_{C1}$  зріс, наприклад, до величини  $M_{C2}$ . Тепер, для тримання нового сталого режиму необхідно мати засіб, що б змінив  $M$ , привівши його у відповідність із новим значенням  $M_C$ . У двигуні внутрішнього згорання цю роль виконає оператор, змінюючи подачу палива. У паровій турбіні – спеціальний регулятор, що збільшить подачу пари. В електричній машині цю роль виконає ЕРС. Дійсно, при зростанні  $M_C$  швидкість двигуна почне знижуватися і, відповідно до (3.2), зменшиться  $E$ . Відповідно до (3.3) маємо

$$I = \frac{U - E}{R}, \quad (3.5)$$

тобто струм зростає, обумовивши тим самим збільшення моменту відповідно до (3.1). Двигун автоматично, без будь-яких зовнішніх впливів перейде в новий сталий стан. Ці процеси будуть мати місце при будь-яких величинах і знаках  $M_C$ , тобто ЕРС буде виконувати функцію регулятора, як у рушійному, так і у гальмівному режимах роботи машини.

## 1.2. Характеристики і режими при незалежному збудженні ( $U = const$ )

При використанні в електроприводі постійного струму двигуна з незалежним збудженням – рис. 3.2 і живленням від джерела напруги  $U = const$ , рівняння електромеханічної характеристики  $\omega(I)$  визначиться шляхом підстановки виразу (3.2) в (3.3) і розв’язанням відносно  $\omega$ :

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - I \frac{R}{k\Phi} \quad (3.6)$$

Механічну характеристику струму з формули (3.1):

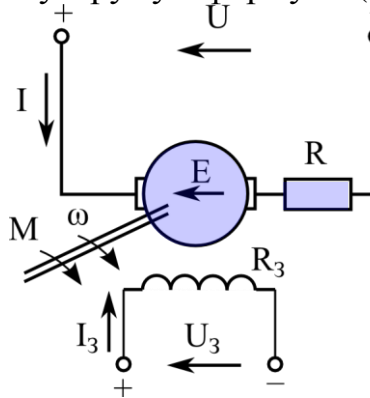


Рис. 3.2. Схема двигуна постійного струму незалежного збудження

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (3.7)$$

При заданих  $U$ ,  $\Phi$  і  $R$  рівняння (3.6) і (3.7) однозначно визначають зв'язок між  $\omega$ ,  $I$  і  $M$  в будь-яких режимах.

Графіки характеристик  $\omega(I)$  і  $\omega(M)$  – прямі лінії, що проходять через дві характерні точки:  $(M = 0, \omega = \omega_0)$  і  $(\omega = 0, I = I_{K3}$  або  $\omega = 0, M = M_{K3})$ ; при  $\Phi = const$ . Вони розрізняються лише масштабами по вісі абсцис.

Швидкість  $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$  (рис. 3.3) відповідає режиму ідеального холостого ходу при  $M=0$  і зустрічному напрямку  $E$  і  $U$ .

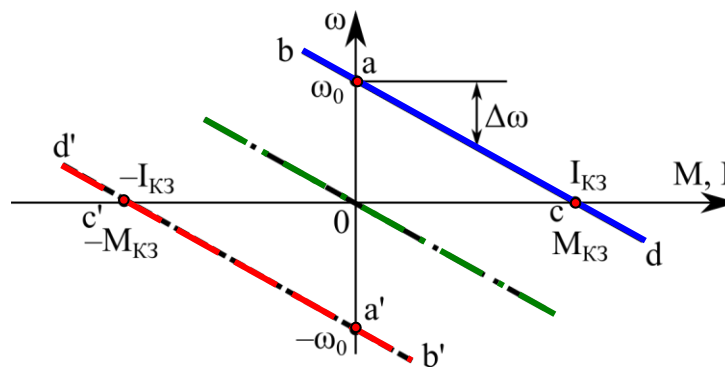


Рис. 3.3. Механічні (електромеханічні) характеристики електропривода постійного струму незалежного збудження при  $U = const$

Величина  $\Delta\omega = \frac{I \cdot R}{k\Phi} = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$  – перепад (падіння) швидкості під впливом навантаження.

З урахуванням прийнятих позначень  $\omega = \omega_0 - \Delta\omega$ . Якщо помножити рівняння на величину моменту  $M$ , то одержимо рівняння балансу потужностей

$$M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 - M \cdot \Delta\omega.$$

Тут  $M\omega_0 = P_{ЕЛ}$  – потужність, споживана від джерела електричної енергії;  $M \cdot \omega = P_{МЕХ}$  – механічна потужність;  $M \cdot \Delta\omega = \Delta P$  – потужність втрат, що перетворюється у тепло в процесі перетворення енергії електродвигуном. Тобто в рушійному режимі

$$P_{МЕХ} = P_{ЕЛ} - \Delta P.$$

Збільшення навантаження до рівня, коли  $\omega = 0$  приводить до *режиму короткого замикання*:  $E = 0$ ,  $I = \frac{U}{R} = I_{КЗ}$ ,  $M = k\Phi I_{КЗ} = M_{КЗ}$ . При цьому вся споживана від джерела електричної енергії потужність розсіюється в якірному колі:  $P_{МЕХ} = 0$ ;  $P_{ЕЛ} = \Delta P$ .

При зміні полярності  $U$  характеристика займе положення, зображене на рис. 3.3 пунктиром.

Ділянки характеристики між точками  $\omega = \omega_0$  та  $M = M_{КЗ}$ , де знаки  $\omega$  і  $M$  збігаються, відповідають, як було домовлено раніше, *руховому режиму* роботи; ділянки з різними знаками  $\omega$  та  $M$  – *гальмівним режимам*.

Всі гальмівні режими є генераторними, оскільки механічна енергія, що надходить з валу машини, перетворюється в електричну. Залежно від того, куди надходить електрична енергія, розрізняють три гальмівних режими.

***а) Гальмування з поверненням енергії в мережу (рекуперативне) або генераторний режим роботи паралельно з мережею***

Якщо якір двигуна обертати від деякого стороннього джерела зі швидкістю, що перевищує швидкість ідеального холостого ходу, то ЕРС двигуна буде більше прикладеної напруги, в результаті чого струм у якорі двигуна і момент змінять свій знак. Механічна енергія, що надходить на вал двигуна, перетвориться в електричну і, за винятком втрат у двигуні, повертається (рекуперується) у мережу.

На графіках рис. 3.3 гальмуванню з віддаванням енергії в мережу відповідають ділянки  $ab$  і  $a'b'$ .

Баланс потужностей у режимі можливо представити формулою

$$P_{МЕХ} = P_{ЕЛ} + \Delta P.$$

***б) Гальмування противмиканням або генераторний режим роботи послідовно з мережею***

У режимі противмиканням двигун налаштований для обертання в один бік, а навантаження змушує його обертатися в протилежний. Швидкість двигуна змінює

знак при збереженні знаку моменту (або знак моменту двигуна при збереженні знаку швидкості). Режим може виникнути при впливі активного моменту статичного навантаження, що перевищує момент короткого замикання на даній характеристиці.

Напрямок ЕРС двигуна буде збігатися з напрямком прикладеної напруги і струм у якорі визначиться виразом:

$$I = \frac{U + E}{R}.$$

Варіант зі зміною знаку моменту використовується для зупинки двигуна шляхом зміни полярності напруги, підведеної до його якоря.

Внаслідок механічної інерції швидкість двигуна і ЕРС у початковий момент зберігаються незмінними, а струм буде дорівнювати:

$$I = \frac{-U - E}{R}.$$

На характеристиках рис. 3.3 гальмуванню противмиканням відповідають ділянки  $cd$  і  $c'd'$ .

У режимі гальмування противмиканням енергія надходить у привод з боку механізму і від мережі та розсіюється на опорах якорного кола:  $P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ЕЛ}} = \Delta P$ . Це енергетично не вигідний режим.

#### ***в) Динамічне гальмування або генераторний режим роботи незалежно від мережі***

Якщо якорне коло відключене від джерела живлення і замкнене на зовнішній резистор, то при обертанні двигуна в якорному колі індукуються ЕРС і протікає струм  $I = -\frac{E}{R}$ , що створює момент. Характеристики проходять через початок

координат (штрих-пунктир рис. 3.3), тому що при цьому  $E = 0$ ,  $I = 0$ ,  $M = 0$ .

Баланс потужностей описується формулою

$$P_{\text{МЕХ}} = \Delta P.$$

### **1.3. Характеристики і режими при живленні якорного кола від джерела струму**

У ряді застосувань якорне коло двигуна постійного струму незалежного збудження живиться не від джерела напруги, як у попередньому випадку, а від джерела струму ( $I = \text{const}$ ) – рис. 3.4. При цьому зберігають силу фундаментальні

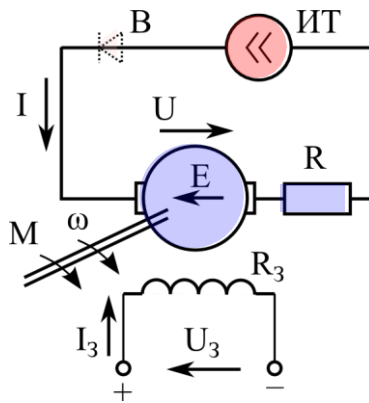


Рис. 3.4. Схема двигуна постійного струму незалежного збудження при живленні якірних кіл від джерела струму

співвідношення (3.1)-(3.3), але властивості електропривода радикально змінюються.

Електромеханічна  $\omega(I)$  та механічна  $\omega(M)$  характеристики представлені тепер вертикальними прямими (рис. 3.5)

$$I = const \quad (3.8)$$

і

$$M = k\Phi I = const \quad (3.9)$$

і привод набуває нової властивості “джерела моменту”. Це пов’язане з тим, що джерело живлення (джерело струму) нейтралізує дію ЕРС. Вона тепер вже не відіграє ролі внутрішнього регулятора і не впливає на швидкість. Величина  $IR$  стає незалежною, а напруга  $U$  – залежною величиною:

$$U = E + IR = k\Phi\omega + IR. \quad (3.10)$$

Тепер характеристика  $\omega(U)$  (рис. 3.5) визначає енергетичні режими роботи електропривода.

Розглянутий привод є “джерелом моменту”. Тому режим ідеального холостого ходу в ньому не реалізується.

Рушійний режим відповідає ділянці  $ab$  в  $I$  квадранті:  $M\omega > 0$ , тобто механічна енергія надходить до споживача – технологічної машини. Так як  $U \cdot I > 0$ , то електрична енергія надходить до свого споживача – двигуна.

Режим короткого замикання розглядається в точці  $a$ , де  $E = 0$  і  $U = IR$ .

На ділянці  $ac$   $M\omega < 0$ . Механічна енергія, яка надходить від технологічної машини, і, перетворюючись в електричну, передається в якірне коло. Оскільки  $U \cdot I > 0$ , то електрична енергія від джерела струму також надходить у якірне коло. Цей режим раніше визначався як гальмування противмиканням.

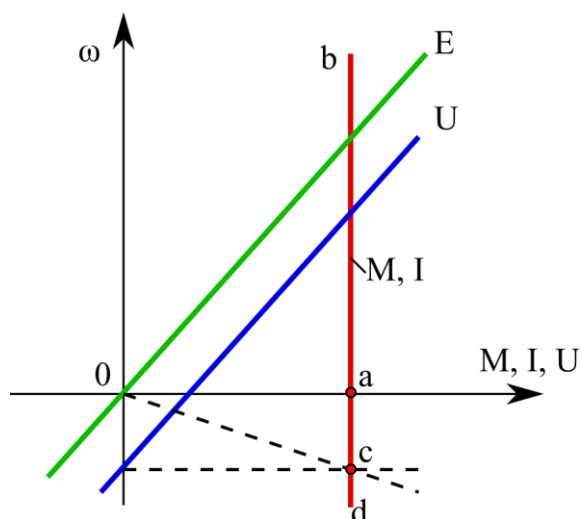


Рис. 3.5. Характеристики електропривода при живленні якоря від джерела струму

У точці, де  $U = 0$  реалізується режим динамічного гальмування, вся механічна енергія, що надійшла, розсіюється в опорах якорного кола.

І, нарешті, на ділянці  $cd$  при  $M\omega < 0$  і  $U \cdot I < 0$  джерело струму дозволяє передати енергію в мережу – виникає рекуперативне гальмування. Якщо джерело струму має однобічну провідність (пунктир на рис. 3.4) такого режиму не буде, і електропривод буде продовжувати працювати в режимі динамічного гальмування (пунктир на рис. 3.5).

#### 1.4. Характеристики і режими при послідовному збудженні

В електроприводах постійного струму іноді використовуються двигуни з послідовним збудженням, коли спеціально виконана обмотка збудження увімкнена послідовно з обмоткою якоря (рис. 3.6).

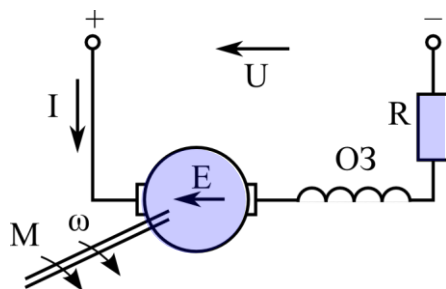


Рис. 3.6. Схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Для двигуна послідовного збудження, як і для інших двигунів постійного струму, при живленні якоря від джерела напруги  $U = const$  справедливі рівняння (3.4) і (3.5). Однак, якщо для двигуна незалежного збудження потік не залежить від



струму навантаження, то для двигуна послідовного збудження потік є функцією струму навантаження.

Залежність  $\Phi(I)$  називається характеристикою намагнічування. Вона не має простого аналітичного опису, а якісний вигляд графіка показаний на рис. 3.7.

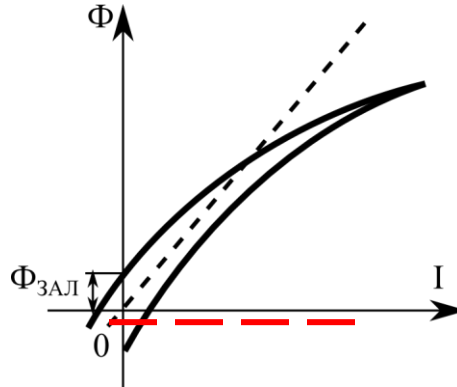


Рис. 3.7. Характеристика намагнічування машини постійного струму

У першому наближенні залежність між швидкістю двигуна і моментом у сталому режимі можна знайти виходячи з припущення, що потік збудження і струм в якорі двигуна зв'язані між собою лінійною залежністю (пунктир на рис. 3.7):

$$\Phi = k_{\Phi} \cdot I.$$

Тоді

$$\omega = \frac{U}{k \cdot k_{\Phi} \cdot I} - \frac{R}{k \cdot k_{\Phi}}, \quad \omega = \frac{U}{k_{\Phi}} - I \frac{R}{k_{\Phi}},$$

а оскільки

$$M = k \cdot \Phi \cdot I = k \cdot k_{\Phi} \cdot I^2,$$

то

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k \cdot k_{\Phi} \cdot M}} - \frac{R}{k \cdot k_{\Phi}}.$$

У цьому випадку графік механічної характеристики двигуна послідовного збудження зображується гіперболою (рис. 3.8). Однією її асимптотою є вісь ординат (вісь  $\omega$ ), а іншою – пряма, паралельна осі абсцис, з координатою

$$\omega = -\frac{R}{k \cdot k_{\Phi}}.$$

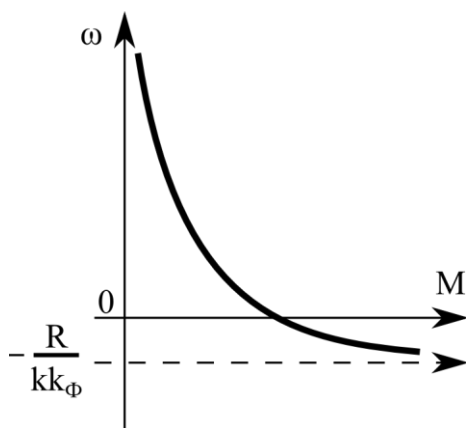


Рис. 3.8. Механічна характеристика двигуна послідовного збудження

Отримані рівняння дають лише загальне уявлення про характеристики електропривода із двигуном послідовного збудження, тому що в дійсності магнітна система машини насичена, і крива намагнічування досить далека від прямої. Тому на практиці зазвичай користуються універсальними характеристиками для серій машин – рис. 3.9, побудованими у відносних величинах

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}, \quad I^* = \frac{I}{I_H} \quad \text{і} \quad M^* = \frac{M}{M_H},$$

де  $\omega_H$ ,  $I_H$  і  $M_H$  – номінальні величини двигуна при додатковому опорі в якірному колі рівному нулю.

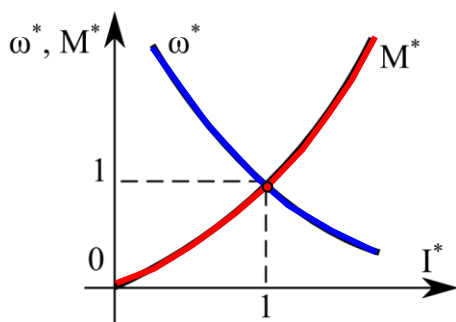


Рис. 3.9. Характеристики двигуна послідовного збудження у відносних величинах

Електропривод із двигуном послідовного збудження може працювати в тих самих енергетичних режимах, що і привод з двигуном незалежного збудження, за винятком режиму ідеального холостого ходу та генераторного режиму паралельно з мережею (рекуперативне гальмування), оскільки при навантаженні, що наближається до нуля, одночасно до нуля наближається і магнітний потік.

Деякі особливості при послідовному збудженні має режим динамічного гальмування.

Якщо якір обертової машини відключити від джерела напруги і замкнути на зовнішній резистор (рис. 3.10, схема ліворуч), то під дією потоку залишкового

намагнічування ( $\Phi_{ЗАЛ}$  на рис. 3.7) у провідниках якоря виникає деяка ЕРС  $E_{ЗАЛ}$ , що викличе в замкненому колі струм. Цей струм, що протікає обмоткою збудження у зворотному напрямку (від b до a) проти вихідного (від a до b), розмагнітить машину ( $\Phi = 0$ ) і гальмівного моменту створено не буде.

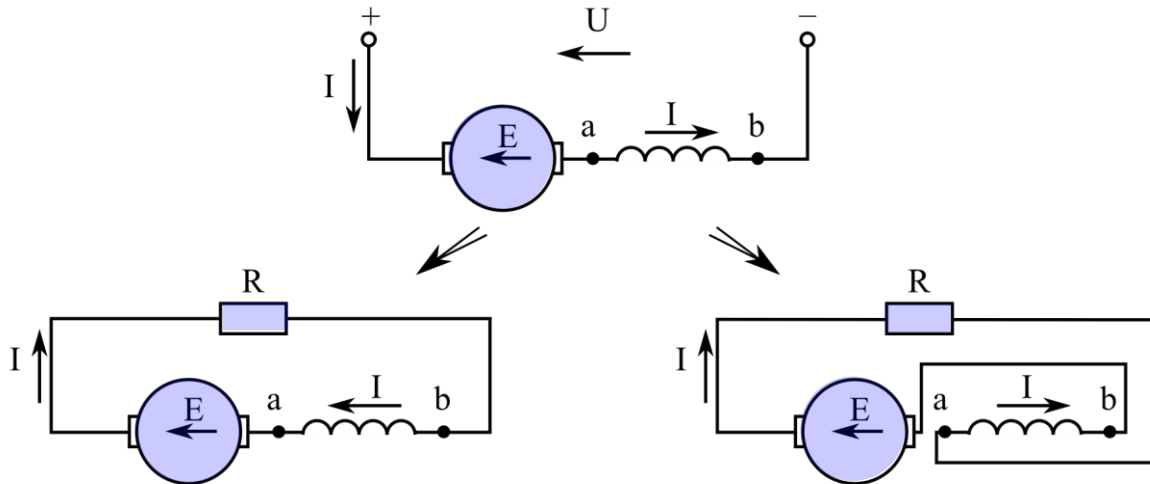


Рис. 3.10. До режиму динамічного гальмування із самозбудженням

Для того, щоб отримати гальмівний момент, струм, створений  $E_{ЗАЛ}$ , повинен протікати в тому ж, що і раніше, напрямку, підсилюючи магнітний потік, тобто створюючи самозбудження. Ця умова виконається, якщо при переході до режиму гальмування перемкнути обмотку збудження як показано на рис. 3.10 на схемі праворуч.

Струм, створений зростаючою ЕРС, змінить знак, момент буде спрямований проти руху, тобто стане гальмівним.

Робота машини постійного струму із самозбудженням можлива лише за певних умов, а саме при таких значеннях швидкості та опору  $R$  кола якоря, щоб мала місце рівність

$$E \geq IR. \quad (3.11)$$

Існуванню цієї рівності відповідає наявність точки перетинання кривих  $E(I)$  (за даної швидкості) і прямої  $IR(I)$  на графіках рис. 3.11. Очевидно, що чим більше  $R$ , тим за більшої швидкості відбудеться самозбудження машини.

Найменша швидкість, при якій машина може самозбуджуватись, досяжна при  $R_{ДОД} = 0$ , тобто при замкненому накоротко якірному колі машини.

Побудову механічної характеристики в режимі динамічного гальмування при самозбудженні можна зробити, виходячи з рівняння балансу потужностей.

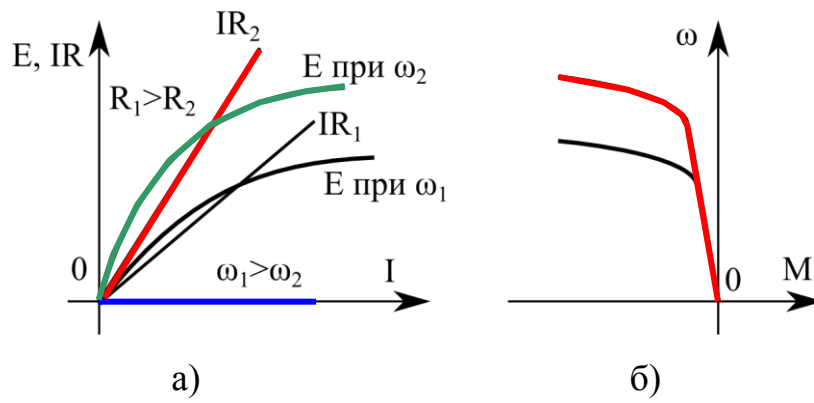


Рис. 3.11. Динамічне гальмування із самозбудженням

Потужність, що розвивається двигуном у режимі динамічного гальмування, цілком розсіюється в опорах якорного контуру, тобто

$$(-I)^2 R = -M \cdot \omega,$$

звідки

$$\omega = -\frac{I^2 R}{M}. \quad (3.12)$$

Знаючи  $R$  та задаючись струмом  $I$ , з універсальної характеристики можнa визначити відповідний цьому струму момент  $M$ , обчислити швидкість  $\omega$  тощо.

Характер залежності  $\omega(M)$  в гальмовому режимі при самозбудженні зображений

на рис. 3.11,б.

В електроприводах постійного струму іноді використовуються двигуни змішаного збудження, що мають дві обмотки збудження, одна із яких включена послідовно в якірне коло, а інша має незалежне живлення.

Двигуни послідовного збудження можуть отримати живлення не тільки від джерела напруги, що було розглянуто вище, але і від джерела струму. Оскільки при цьому магнітний потік буде незмінним, зберігаються і основні властивості електропривода, розглянуті раніше.

### **ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ**

1. Основні рівняння двигуна постійного струму незалежного збудження.
2. Рівняння руху у контексті використання для ДПС.
3. Механічна та електромеханічна характеристика ДПС при живленні від джерела напруги.
4. Рівняння балансу потужностей у системі ДПС. Режими К.З. та Х.Х.
5. Генераторний режим роботи ДПС паралельно з мережею.
6. Генераторний режим роботи ДПС послідовно з мережею.
7. Генераторний режим роботи ДПС незалежно від мережі.
8. Характеристики і режими при живленні ДПС від джерела струму.
9. Характеристики ДПС при послідовному збудженні.