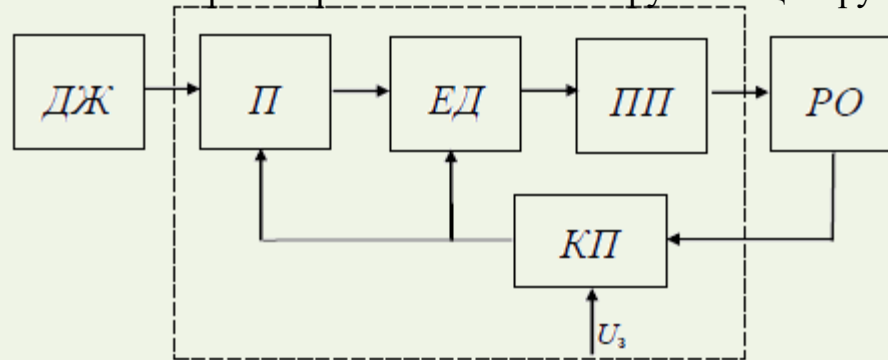


ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОД

Електричним приводом (ЕП) називається електромеханічна система, що складається з електродвигунного, перетворювального, передавального і керуючого пристроїв, призначених для приведення в рух виконавчих органів робочих машин і керування цим рухом.



Структурна схема електропривода: ЕД – електродвигун; ПП – передавальний пристрій; П – перетворювач; КП – керуючий пристрій; ДЖ – джерело живлення; РО – робочий орган

За видами регулювання:

Нерегульованими називають ЕП, швидкість робочих механізмів у яких незмінна.

Регульованими називають ЕП, в яких частота обертання двигуна може змінюватися під впливом сигналу керування.

Слідкуючими називають ЕП, які здатні забезпечувати автоматичне перетворення будь-якого не заданого заздалегідь вхідного сигналу на рух виробничого механізму.

Програмно-керованими називають ЕП, у яких лінійне або обертове переміщення здійснюється за заданою програмою.

Адаптивним називають ЕП, здатний здійснювати автоматичний вибір найкращого режиму роботи двигуна за допомогою зміни структури і параметрів системи керування.

Залежно від способу передачі механічної енергії:

Груповим називається ЕП, у якому один двигун надає рух за допомогою трансмісії або передачі групі робочих машин або групі робочих органів однієї машини.

Одиночним називається ЕП, у якому електродвигун надає рух тільки одному робочому органу машини.

Багатодвигуновим називається ЕП, в якому робочі органи однієї машини приводяться до руху декількома електродвигунами.

2. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Механічні характеристики виробничих механізмів і електродвигунів

Механічна характеристика виробничого механізму $M_c = f(\omega)$.

Механічна характеристика електродвигуна $\omega = f(M)$.

Момент опору

$$M_c = M_{xx} + (M_{сн} - M_{xx}) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x,$$

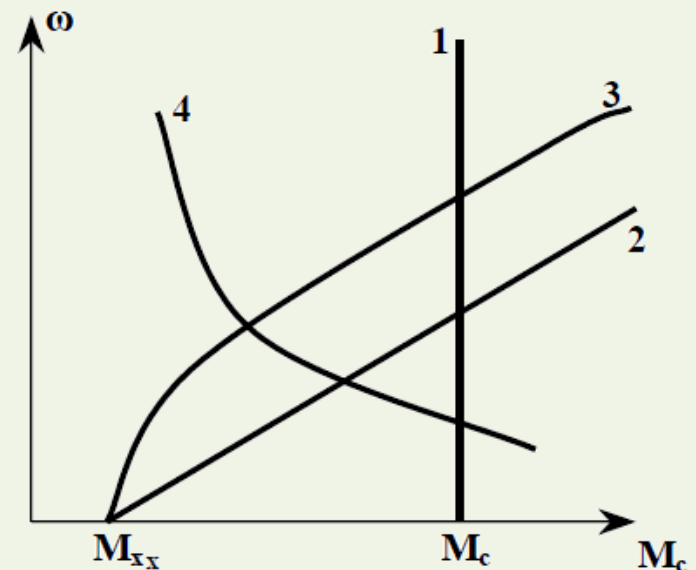
де M_{xx} – момент холостого ходу механізму; $M_{сн}$ – момент статичного опору при номінальній швидкості; x – показник степеня, що характеризує зміну моменту опору у функції швидкості ω .

1. Механічна характеристика, що не залежить від швидкості (пряма 1), для якої $x = 0$, $M_c = M_{сн} = \text{const}$.

2. Лінійно зростаюча механічна характеристика (пряма 2), $x = 1$, момент опору $M_c = \left(\frac{M_{сн}}{\omega_n} \right) \omega = k\omega$ лінійно залежить від швидкості.

3. Нелінійно зростаюча механічна характеристика (крива 3), $x = 2$.

4. Нелінійно спадаюча механічна характеристика (крива 4), $x = -1$.



Механічні характеристики виробничих механізмів

Жорсткість механічної характеристики електропривода – відношення приросту електромагнітного моменту, що розвиваються електродвигуном, до відповідного приросту кутової швидкості

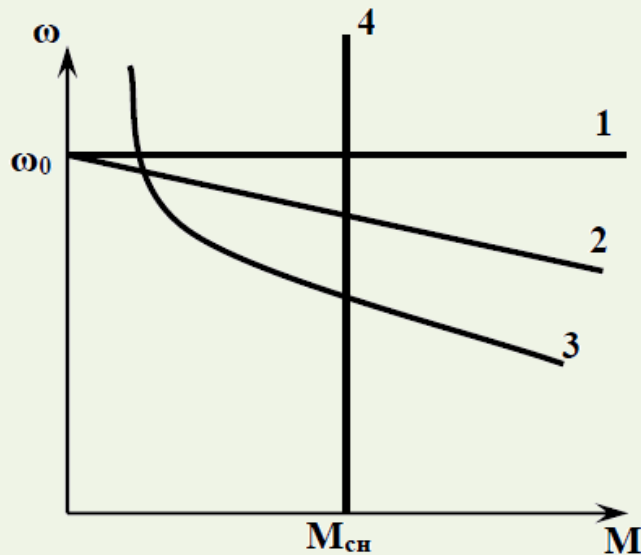
$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}.$$

Для нелінійних характеристик

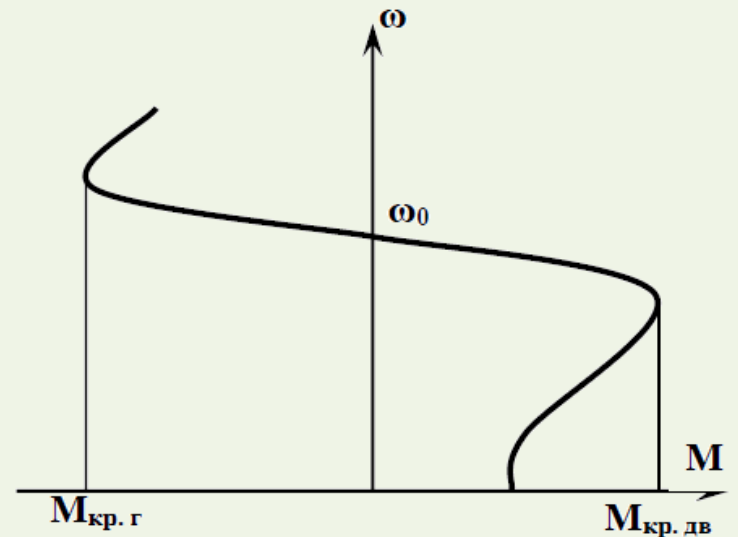
$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}.$$

1. Абсолютно жорстка механічна характеристика, $\beta = \infty$ (пряма 1);

2. Жорстка механічна характеристика, коли при зміні моменту від нуля до номінального швидкість змінюється незначно (до 10-15%) (пряма 2);



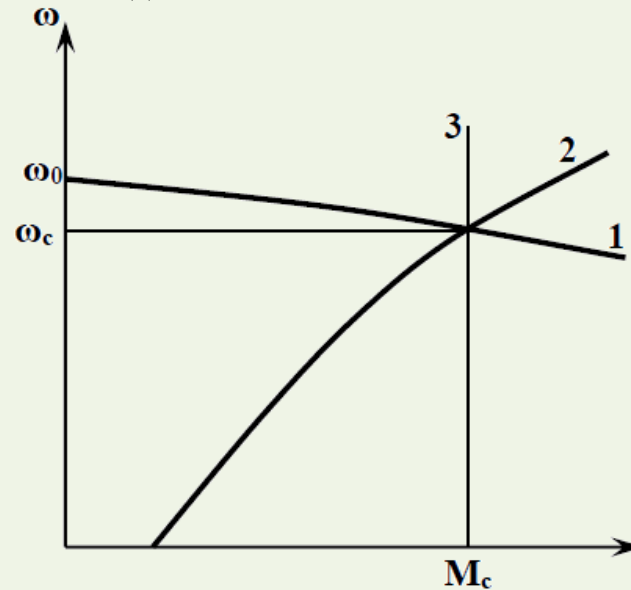
Механічні характеристики електродвигунів: 1 – синхронного; 2-3 – двигунів постійного струму відповідно незалежного та послідовного збудження



Механічна характеристика асинхронного двигуна

3. М'яка механічна характеристика, для якої зі зміною моменту значно змінюється швидкість (крива 3);

4. Абсолютно м'яка механічна характеристика ($\beta = 0$) – це характеристика, для якої момент двигуна зі зміною кутової швидкості залишається незмінним.



До знаходження координат усталеного режиму (ω_c, M_c)

Механічні характеристики двигунів і механізмів дають змогу вирішити такі завдання:

- знайти координати усталеного руху (M_c та ω_c);
- визначити стійкість руху в усталеному режимі;
- встановити відповідність механічних характеристик двигуна та виробничого механізму;
- встановити основні способи регулювання швидкості та моменту двигуна й виконати їх порівняльний аналіз;
- визначити енергетичні режими роботи двигуна й механізму.

2.2. Статична стійкість електропривода

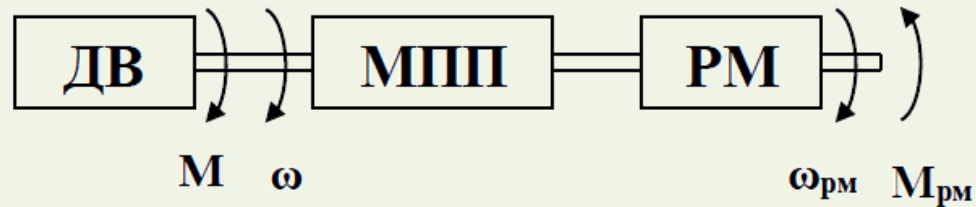
Під **статичною стійкістю** розуміють такий стан сталого режиму роботи привода, коли при появі випадкового відхилення швидкості від сталого значення привод повернеться до точки сталого режиму. Привод є статично стійким, якщо в точці сталого режиму виконується умова

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} < 0,$$

або

$$\beta - \beta_c < 0.$$

2.3. Приведена механічна ланка



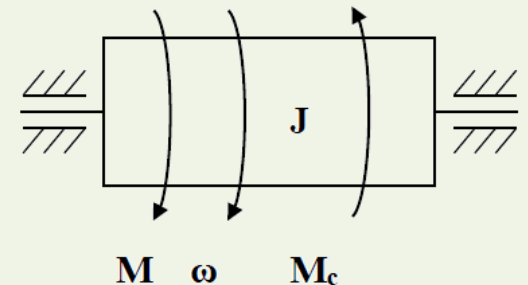
Кінематична схема електроприводу обертового руху

Потужність початкової та розрахункової схем:

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\text{рм}}}{\eta} = \frac{M_{\text{рм}} \omega_{\text{рм}}}{\eta}; \quad P_{\text{роз}} = M_c \omega.$$

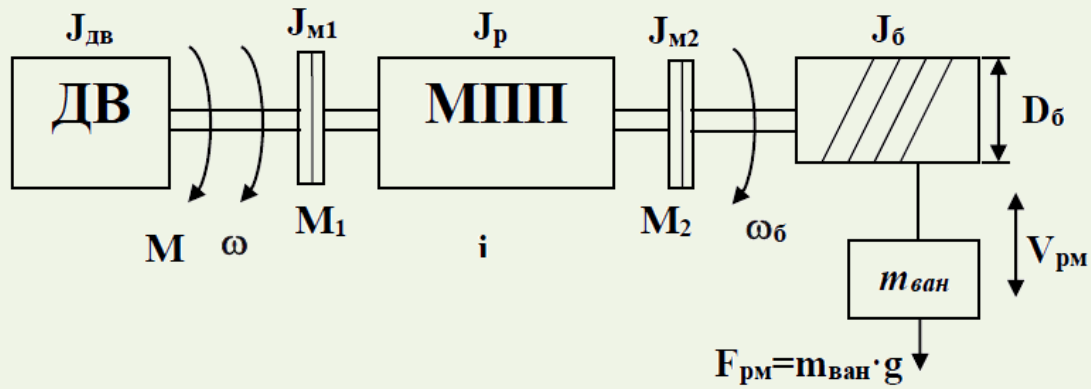
Прирівнюючи вирази

$$M_c = \frac{M_{\text{рм}} \omega_{\text{рм}}}{\eta \omega} = \frac{M_{\text{рм}}}{i \eta},$$



Розрахункова одномасова схема механічної частини електропривода

де $i = \omega / \omega_{\text{рм}}$ – передавальне відношення (коефіцієнт) механічної передачі.



Кінематична схема підйомного механізму

Для початкової та розрахункової схем:

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\text{рм}}}{\eta} = \frac{F_{\text{рм}} V_{\text{рм}}}{\eta}; \quad P_{\text{роз}} = M_c \omega.$$

$$M_c = \frac{F_{\text{рм}} V_{\text{рм}}}{\eta \omega} = \frac{m_{\text{ван}} g V_{\text{рм}}}{\eta \omega} = \frac{F_{\text{рм}} \rho}{\eta},$$

де ρ – радіус зведення зусилля робочої машини $F_{\text{рм}}$ до валу двигуна у вигляді моменту опору.

Кінетична енергія початкової схеми визначається сумою кінетичних енергій усіх рухомих ланок

$$W_{\Pi} = \frac{J_{\text{дв}} \omega^2}{2} + \frac{J_{\text{М1}} \omega^2}{2} + \frac{J_p \omega^2}{2} + \frac{J_{\text{М2}} \omega_{\text{б}}^2}{2} + \frac{J_{\text{б}} \omega_{\text{б}}^2}{2} + \frac{m_{\text{ван}} V_{\text{рм}}^2}{2}.$$

Кінетична енергія розрахункової схеми

$$W_{\text{роз}} = \frac{J \omega^2}{2}.$$

Приведений момент інерції:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{М1}} + J_{\text{р}} + \frac{J_{\text{М2}}}{i^2} + \frac{J_{\text{б}}}{i^2} + \frac{m_{\text{ван}} V_{\text{рм}}^2}{\omega^2}.$$

У загальному випадку

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\Sigma} + \sum_{k=1}^n \frac{J_k}{i_k^2} + \sum_{k=1}^n m_k \rho_k^2.$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна, J_{Σ} – сума моментів інерції інших механічних ланок, що обертаються зі швидкістю двигуна; J_k – момент інерції k -го обертового елемента; i_k – передаточне відношення редуктора від валу двигуна до k -го обертового елемента; m_k – маса k -го елемента, що рухається поступально; $\rho_k = V_k/\omega$ – радіус зведення k -го елемента, що рухається поступально, до валу двигуна.

2.4. Рівняння руху електропривода

Другий закон Ньютона

для обертового руху:
$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt},$$

для поступального руху:
$$\sum F = m \frac{dv}{dt} = ma,$$

де $\sum M$, $\sum F$ – результуючі моменти та сили, що діють на тіло; J , m – зведені до однієї швидкості момент інерції та маса; $d\omega/dt = \varepsilon$ – кутове прискорення тіла, що обертається; $dv/dt = a$ – прискорення тіла, що рухається поступально.

Рівняння обертового руху

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Для поступального руху

$$F - F_c = F_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt}.$$

У загальному випадку

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент інерції тіла

$$J = mr^2,$$

де m – маса тіла, що обертається навколо осі; r – радіус інерції. Для суцільного циліндра масою m та радіусом r момент інерції відносно поздовжньої осі

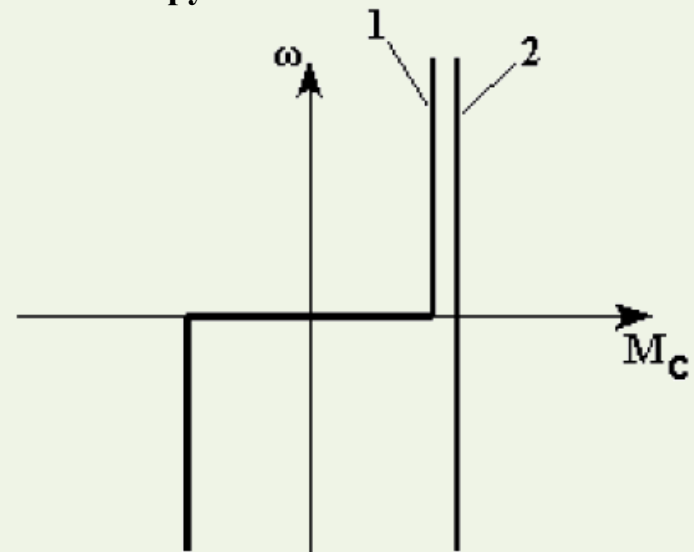
$$J_{\text{ц}} = mr^2 / 2.$$

Маховий момент gD^2 , $J = gD^2/4$.

2.5. Знаки моментів. Активний та реактивний моменти опору

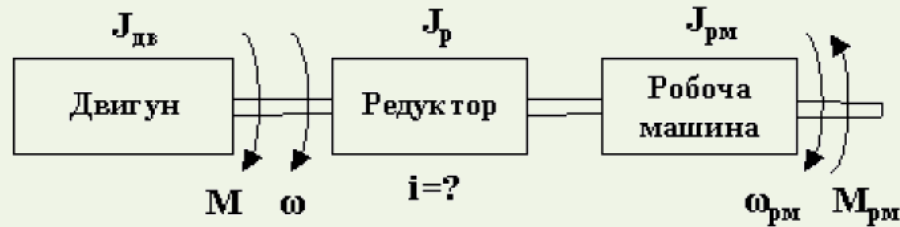
Якщо моменти співпадають з напрямком руху, то вони позитивні й у рівнянні руху беруться зі знаком плюс. Якщо момент спрямований у бік, зворотний до напрямку руху, то він вважається негативним і у рівнянні руху приймається зі знаком мінус.

Реактивний момент виникає внаслідок руху і створюється силами реакції середовища на рухоме тіло (сили тертя, різання, непружних деформацій тощо). Завжди спрямований проти руху. Активний момент опору виникає незалежно від руху й створюється найчастіше силами тяжіння й пружних деформацій



Графічне зображення реактивного (1) та активного (2) моментів опору

2.6. Оптимальне передаточне відношення редуктора



До визначення оптимального передаточного відношення редуктора

Розрахунок часу перехідного процесу оснований на інтегруванні рівняння руху:

$$dt = J \frac{d\omega}{\pm M \pm M_c}$$

Час, що потрібен для зміни швидкості від ω_1 до ω_2 , визначається як:

$$t_{\text{пер}} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J d\omega}{\pm M \pm M_c}$$

Якщо $M = \text{const}$, $J = \text{const}$ і $M_c = \text{const}$, отримаємо:

$$t_{\text{пер}} = \frac{J(\omega_1 - \omega_2)}{M \pm M_c}$$

Час розгону (гальмування) двигуна від 0 до ω_c (від ω_c до 0) визначиться виразом

$$t_{\text{пер}} = \frac{J\omega_c}{M \pm M_c}$$

Приведені величини моментів опору та інерції

$$J = kJ_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{рм}}}{i^2}; \quad M_c = \frac{M_{\text{рм}}}{i\eta},$$

де $k = (1, 1 \div 1, 3)$ – коефіцієнт, що враховує момент інерції редуктора.

Без урахування ККД

$$M_c = \frac{M_{рм}}{i}$$

Статична швидкість двигуна $\omega_c = \omega_{рм} i$.

Час перехідного процесу

$$t_{пер} = \left(kJ_{дв} i^2 + J_{рм} \right) \frac{\omega_{рм}}{Mi \pm M_{рм}}$$

Оптимальне передаточне відношення згідно з $dt_{пер}/di = 0$

$$\frac{dt_{пер}}{di} = \frac{2kJ_{дв} i \omega_{рм} (Mi \pm M_{рм}) - M (kJ_{дв} i^2 + J_{рм}) \omega_{рм}}{(Mi \pm M_{рм})^2}$$

$$kJ_{дв} Mi^2 \pm 2kJ_{дв} i M_{рм} - M J_{рм} = 0.$$

$$i_{опт} = \pm \frac{M_{рм}}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_{рм}}{M} \right)^2 + \frac{J_{рм}}{kJ_{дв}}}$$

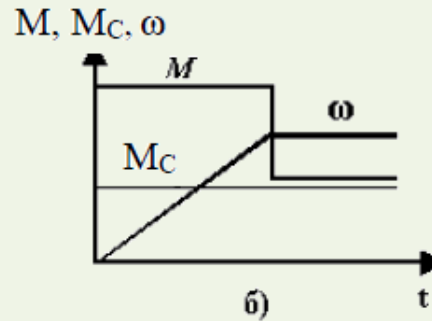
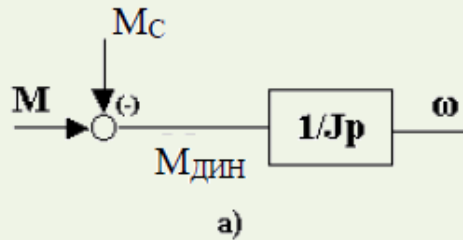
При роботі приводу вхолосту ($M_{рм} = 0$)

$$i_{опт} = \sqrt{\frac{J_{рм}}{kJ_{дв}}}$$

2.7. Механічна частина електроприводу як об'єкт керування

Для абсолютно жорсткої системи, що описується рівнянням руху $M - M_c = Jp\omega$, передаточна функція механічної частини за результуючим вхідним впливом $M_{дин} = M - M_c$:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M_{дин}(p)} = \frac{1}{Jp}$$



Структурна схема (а) та перехідні процеси (б) для абсолютно жорсткої механічної частини електроприводу

При зміні моменту двигуна за експоненціальним законом зі сталою часу T

$$M = M_{\text{поч}} e^{-t/T},$$

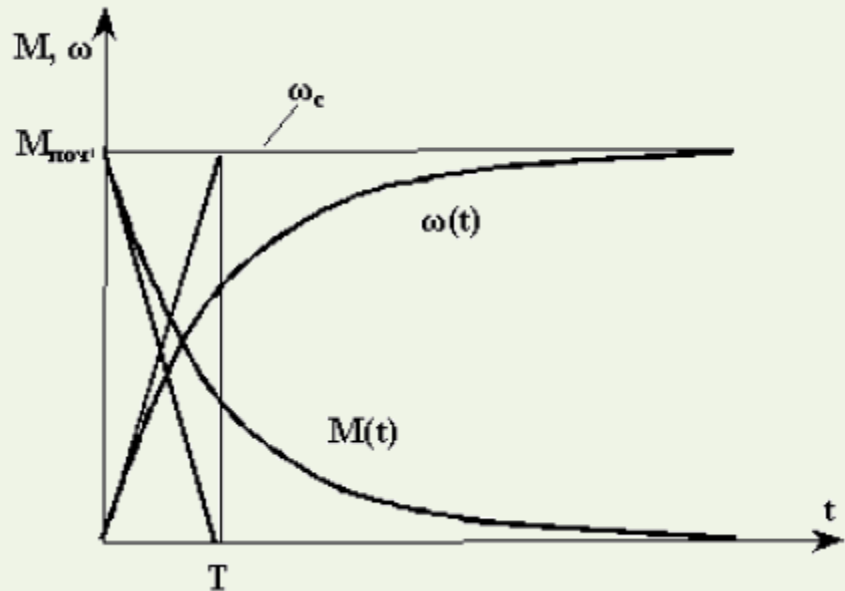
швидкість двигуна $\omega = \omega_c (1 - e^{-t/T})$,

де $\omega_c = \varepsilon_{\text{поч}} T$ – статична (усталена)

швидкість двигуна;

$\varepsilon_{\text{поч}} = \frac{M_{\text{поч}} - M_c}{J}$ – початкове прискорення

приводу.



Перехідний процес пуску електроприводу вхолосту при $M = M_{\text{поч}} e^{-t/T}$

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

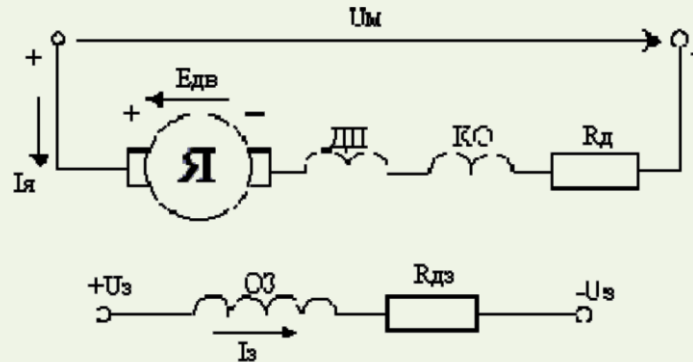


Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження: ДП – додаткові полюси, КО – компенсаційна обмотка (напрямки на схемі відповідають рушійному режиму)

Рівняння двигуна постійного струму:

$$E_{\text{дв}} = k\Phi\omega;$$

$$M = k\Phi I_{\text{я}};$$

$$U_{\text{м}} = E_{\text{дв}} + I_{\text{я}}R_{\text{я}},$$

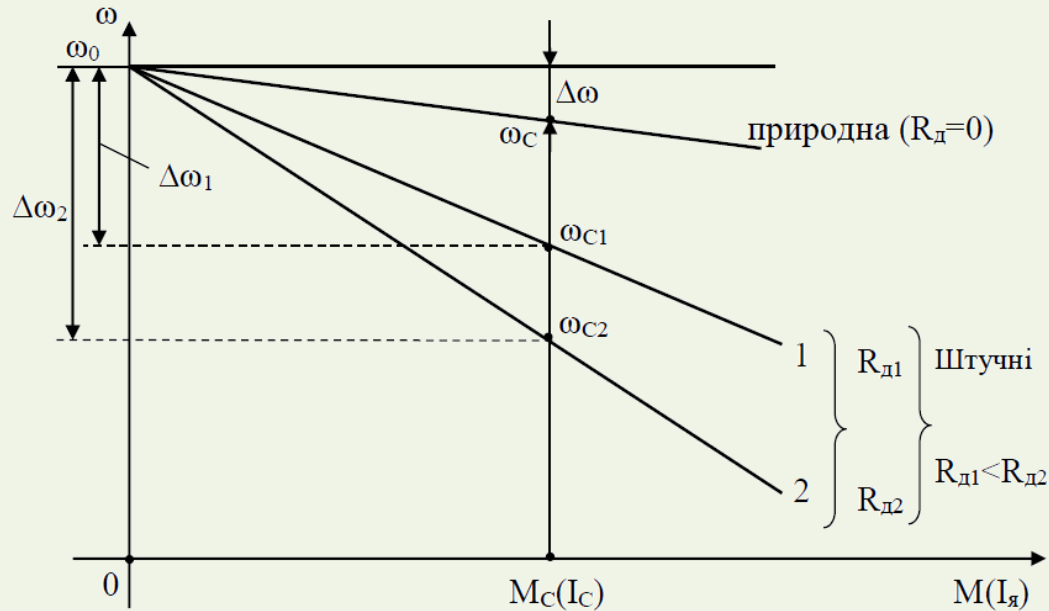
де $k = pN/2\pi a$ – конструктивна стала двигуна; p (або Z_n) – кількість пар полюсів двигуна; N – кількість активних провідників обмотки якоря; Φ – магнітний потік двигуна; $I_{\text{я}}$ – струм якоря; ω – кутова швидкість двигуна; $R_{\text{я}} = r_{\text{я}} + R_{\text{д}}$ – сумарний опір якірного кола; $r_{\text{я}} = r_{\text{об.я}} + r_{\text{к.о}} + r_{\text{д.п}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{щ}}$ – опір якоря, що включає опір обмотки якоря ($r_{\text{об.я}}$), компенсаційної обмотки ($r_{\text{к.о}}$), додаткових полюсів ($r_{\text{д.п}}$), з'єднувальних проводів ($r_{\text{пр}}$) та щіток ($r_{\text{щ}}$); $R_{\text{д}}$ – опір додаткового резистора, a – кількість пар паралельних віток.

Рівняння електромеханічної характеристики двигуна $\omega = f(I_{\text{я}})$:
$$\omega = \frac{U_{\text{м}}}{k\Phi} - \frac{I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega.$$

Рівняння механічної характеристики двигуна $\omega = f(M)$: $\omega = \frac{U_M}{k\Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} = \omega_0 - \Delta\omega$.

Швидкість ідеального холостого ходу $\omega_0 = \frac{U_M}{k\Phi}$.

Струм якоря $I_{\text{я}} = \frac{U_M - E_{\text{дв}}}{R_{\text{я}}}$.



Механічні (електромеханічні) характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

Статичний спад швидкості двигуна $\Delta\omega = \frac{I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{я}})}{k\Phi} = \frac{M(r_{\text{я}} + R_{\text{я}})}{k^2\Phi^2}$.

Струм короткого замикання $I_{\text{к.з}} = \frac{U_M}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$, момент короткого замикання $M_{\text{кз}} = k\Phi I_{\text{к.з}}$.

Момент
$$M = \frac{k^2 \Phi^2 (\omega_0 - \Delta\omega)}{r_{\text{я}} + R_{\text{я}}}.$$

Жорсткість механічної характеристики
$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega} = \frac{k^2 \Phi^2}{r_{\text{я}} + R_{\text{я}}}.$$

Для двигуна звичайного виконання допустимий струм

$$I_{\text{я.доп}} = (2 \dots 2,5) I_{\text{я.н}} = \lambda_{\text{дв}} I_{\text{я.н}},$$

де $\lambda_{\text{дв}}$ – перевантажувальна здатність двигуна, що обмежується умовами нормальної комутації.

Для двигунів спеціального призначення

$$I_{\text{я.доп}} = (5 \dots 15) I_{\text{я.н}}.$$

У відносних одиницях для ДПС незалежного збудження:

$$I_{\text{я}}^* = I_{\text{я}} / I_{\text{я.н}}; U_{\text{я}}^* = U_{\text{я}} / U_{\text{н}}; \omega^* = \omega / \omega_0; R_{\text{я}}^* = R_{\text{я}} / R_{\text{н}},$$

де $R_{\text{н}} = U_{\text{н}} / I_{\text{я.н}}$.

Рівняння електромеханічної характеристики у відносних одиницях:

$$\omega^* = 1 - I_{\text{я}}^* R_{\text{я}}^*.$$

Рівняння механічної характеристики у відносних одиницях:

$$\omega^* = 1 - M^* R_{\text{я}}^*.$$

3.2. Побудова механічних характеристик двигуна постійного струму за паспортними даними

Паспортні дані двигуна: $U_{\text{н}}$, В; $I_{\text{н}}$, А; $P_{\text{н}}$, кВт; $n_{\text{н}}$, об/хв.

Координати точок:

1) точка, що відповідає номінальному режиму $M = M_{\text{н}}$; $\omega = \omega_{\text{н}}$; 2) точка ідеального холостого ходу $M = 0$; $\omega = \omega_0$.

Номинальна кутова швидкість

$$\omega_{\text{H}} = \frac{\pi n_{\text{H}}}{30}.$$

Номинальне значення електромагнітного моменту

$$M_{\text{H}} = k\Phi I_{\text{H}},$$

де

$$k\Phi = \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{H}} r_{\text{я}}}{\omega_{\text{H}}}.$$

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi}.$$

Для побудови штучних механічних характеристик при заданому $R_{\text{д}}$ швидкість двигуна

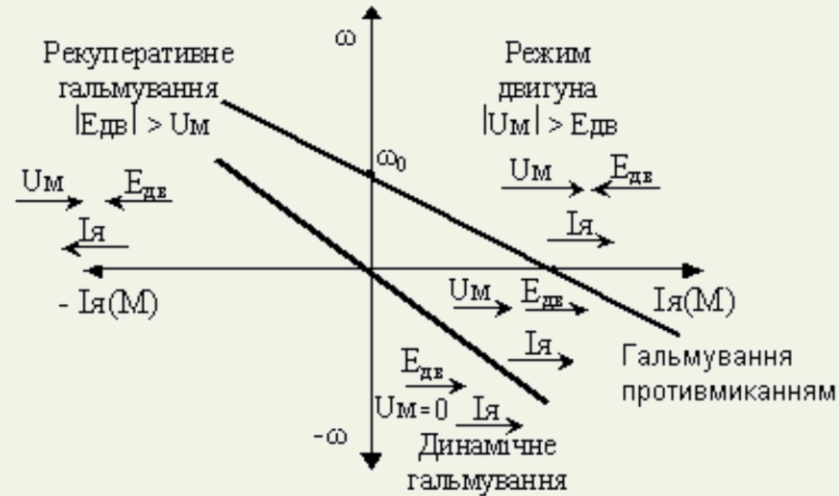
$$\omega_{\text{H.ш}} = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi} - \frac{I_{\text{H}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k^2\Phi^2}.$$

опір якоря

$$r_{\text{я}} = 0,5 \frac{U_{\text{H}}}{I_{\text{H}}} (1 - \eta_{\text{H}}),$$

де $\eta_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{U_{\text{H}} I_{\text{H}}}$ – номінальний ККД двигуна.

3.3. Гальмівні режими ДПС незалежного збудження



Механічні характеристики двигуна незалежного збудження у гальмівних режимах

Способи електричного гальмування ДПС незалежного збудження

1) Гальмування з віддачею енергії в мережу (рекуперативне) відбувається, коли швидкість двигуна більше швидкості ідеального холостого ходу. В цьому режимі ЕРС більше прикладеної напруги, тому струм змінює напрямок

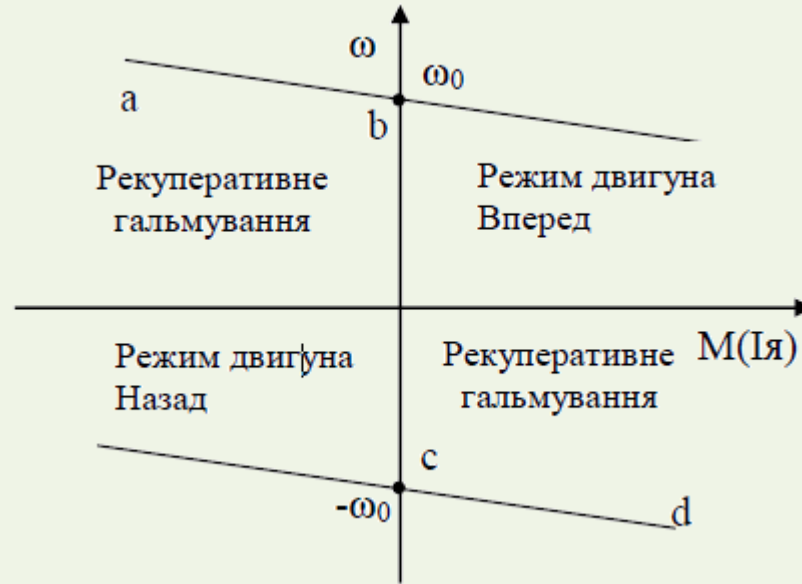
$$I_{я} = \frac{U_{м} - E_{дв}}{R_{я}},$$

і момент двигуна стає гальмівним

$$M_{Г} = -k\Phi I_{я}.$$

Рівняння електромеханічної та механічної характеристик:

$$\omega = \frac{U_M}{k\Phi} + \frac{I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{k\Phi} = \omega_0 + \Delta\omega; \quad \omega = \frac{U_M}{k\Phi} + \frac{MR_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} = \omega_0 + \Delta\omega.$$



Механічні характеристики двигуна постійного струму (режиму рекуперативного гальмування відповідають ділянки ab та cd)

2) Гальмування противмиканням відбувається, коли обмотки двигуна ввімкнені для одного напрямку обертання, а якір двигуна обертається в протилежний бік. Такий режим можна реалізувати:

а) зміною полярності підведеної напруги;

б) у приводі підйомної установки, коли двигун включений на підйом, але під дією перевищуючого моменту, що розвивається вантажем, обертається у напрямку спуску вантажу.

Струм у колі якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U_M + E_{\text{дв}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

3) Динамічне гальмування відбувається при від'єднанні якоря двигуна від мережі і замикання його на реостат. Обмотка збудження залишається приєднаною до мережі.

Струм якоря
$$I_{\text{я}} = \frac{-E_{\text{дв}}}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} = \frac{-k\Phi\omega}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

Момент двигуна
$$M = -k\Phi I_{\text{я}} = -\frac{k^2\Phi^2\omega}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

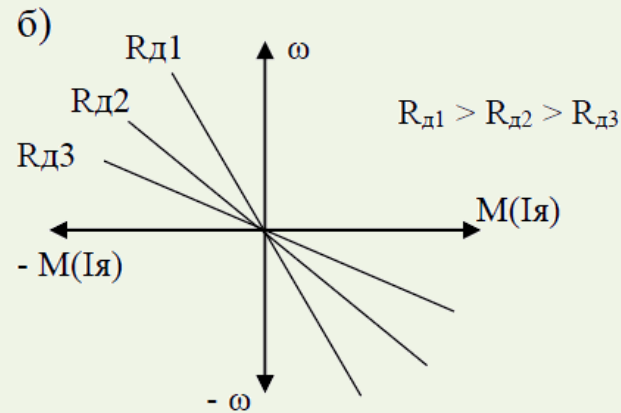
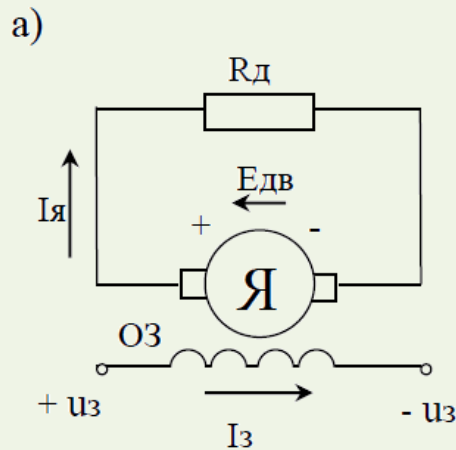


Схема вмикання (а) та механічні характеристики (б) двигуна незалежного збудження в режимі динамічного гальмування

Рівняння електромеханічної та механічної характеристик:

$$\omega = -\frac{I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi}; \quad \omega = -\frac{M(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k^2\Phi^2}.$$

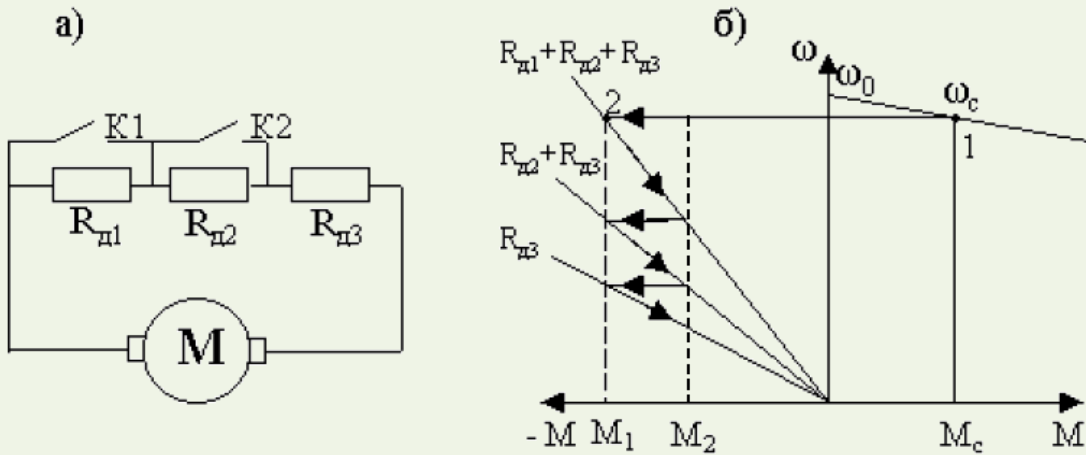


Схема вмикання (а) та механічні характеристики (б) триступінчатого динамічного гальмування

3.4. Динамічні властивості двигуна постійного струму незалежного збудження

Рівняння напруг для кола

збудження та якоря:

$$U_3 = i_3 R_3 + L_3 p i_3 = i_3 R_3 (1 + T_3 p);$$

$$U_я = i_я R_я + L_я p i_я + e_{дв} = i_я R_я (1 + T_я p) + e_{дв},$$

де $p = d/dt$ – оператор диференціювання;

$e_{дв} = k\Phi$ – ЕРС двигуна.

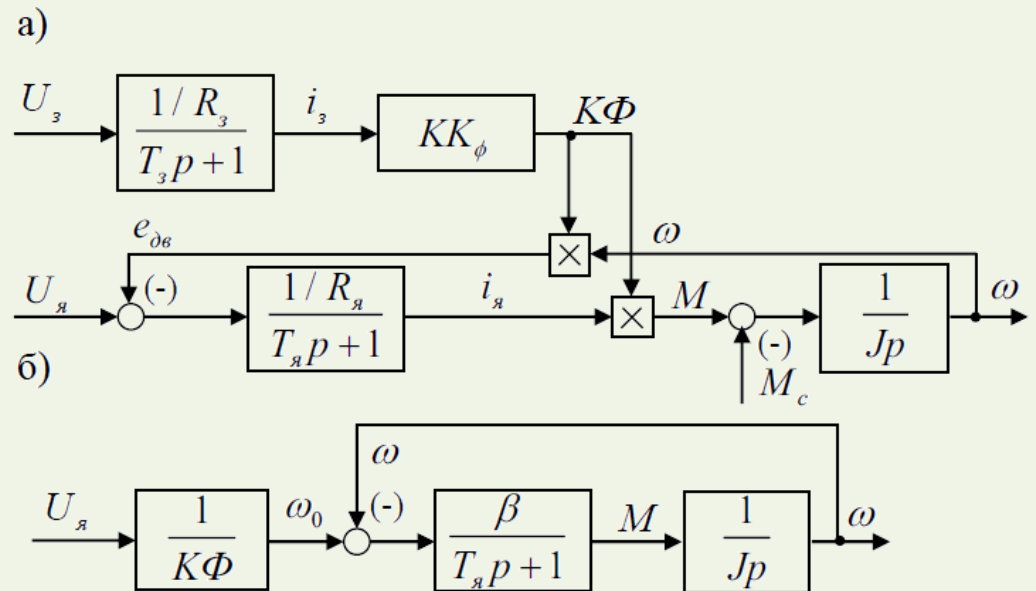
Два можливі канали керування:

а) канал керування полем двигуна,

якому відповідає керуюча дія U_3 ;

б) канал керування колом якоря з

керуючою дією $U_я$.



Структурні схеми електромеханічного перетворювання енергії в двигуні постійного струму з незалежним збудженням

Стала часу кола збудження $T_3 = L_3/R_3$.

Індуктивність кола збудження

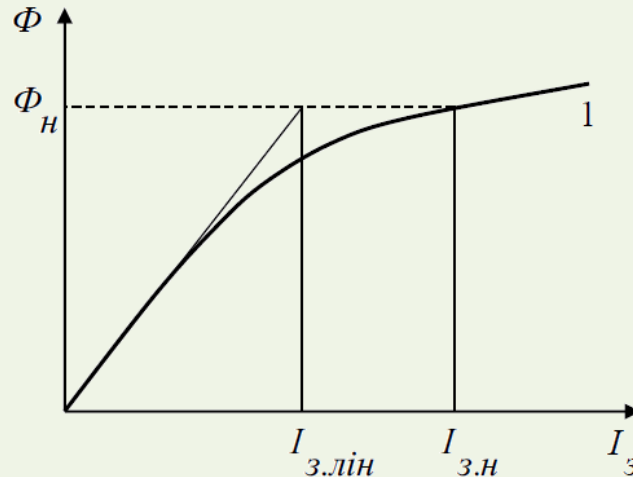
$$L_3 = 2Z_n K_3 W_{03} \Phi_H I_{3.H},$$

де Z_n – кількість пар полюсів; W_{03} – кількість витків обмотки збудження; Φ_H – номінальний потік одного полюса; $K_3 = 1 + (0,5 \dots 0,7)(\sigma - 1)$ – коефіцієнт, що враховує те, що частина потоку розсіювання зчеплена не з усіма витками обмотки збудження; $\sigma = 1,1 \dots 1,15$ – коефіцієнт розсіювання.

Коефіцієнт насичення

$$K_{\text{нас}} = I_{3.H} / I_{3.\text{лін}},$$

де $I_{3.\text{лін}}$ – струм збудження, необхідний для створення номінального магнітного потоку за відсутності насичення



Визначення індуктивності обмотки збудження на лінійній ділянці кривої намагнічування I

На нелінійній ділянці кривої намагнічування індуктивність

$$L_{3.\text{нас}} = 2Z_n K_3 W_{03} (d\Phi/di_3).$$

Передаточна функція двигуна

$$W_{\text{дв}(p)} = \frac{\omega(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{я}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1},$$

де $K_{\text{дв}} = 1/k\Phi$ – коефіцієнт передачі двигуна, $T_{\text{м}} = JR_{\text{я}}/(k\Phi)^2$ – електромеханічна стала часу, яка змінюється в більш широких межах, ніж $T_{\text{я}}$; J – сумарний момент інерції, $U_{\text{вх}} = U_{\text{я}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ – вхідна дія.

Характеристичне рівняння $T_{\text{м}}T_{\text{я}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1 = 0$ має корені:

$$p_{1-2} = -\frac{1}{2T_{\text{я}}} \pm \sqrt{\frac{T_{\text{м}} - 4T_{\text{я}}}{4T_{\text{м}}T_{\text{я}}^2}}.$$

Якщо $T_{\text{м}} > 4T_{\text{я}}$, передаточна функція двигуна набуває вигляду:

$$W_{\text{дв}(p)} = \frac{\omega(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{м}}p + 1}.$$

3.5. Механічні характеристики ДПС послідовного збудження

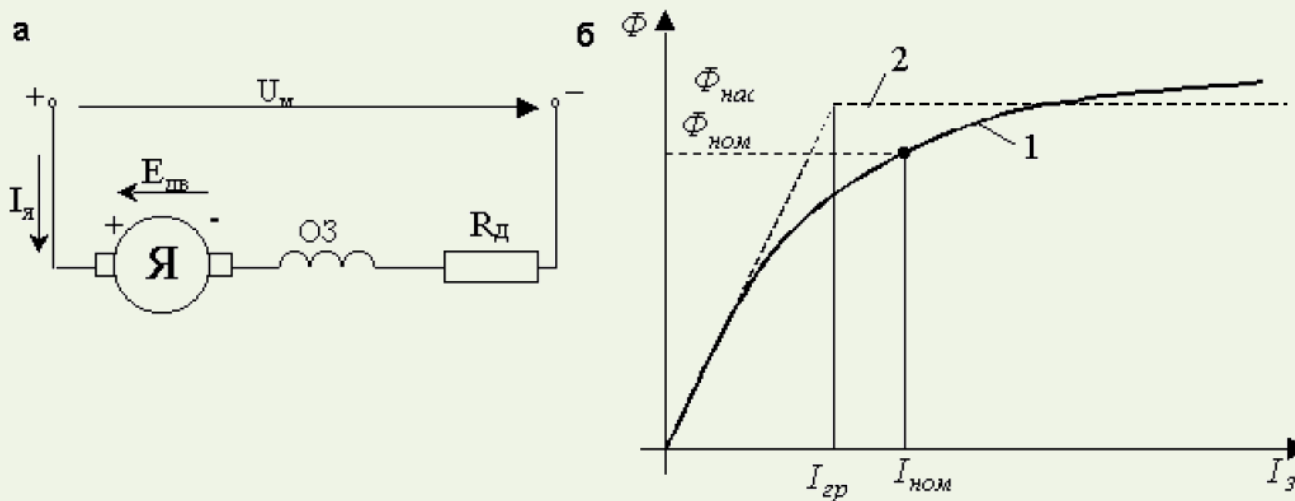


Схема вмикання (а) та характеристика намагнічування (б) двигуна постійного струму послідовного збудження

Рівняння електромеханічної та механічної характеристик мають вигляд:

$$\omega = \frac{U_M - I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi(I_{\text{я}})}; \quad \omega = \frac{U_M}{k\Phi(I_{\text{я}})} - \frac{M(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k^2\Phi(I_{\text{я}})^2}.$$

Апроксимовані характеристики:

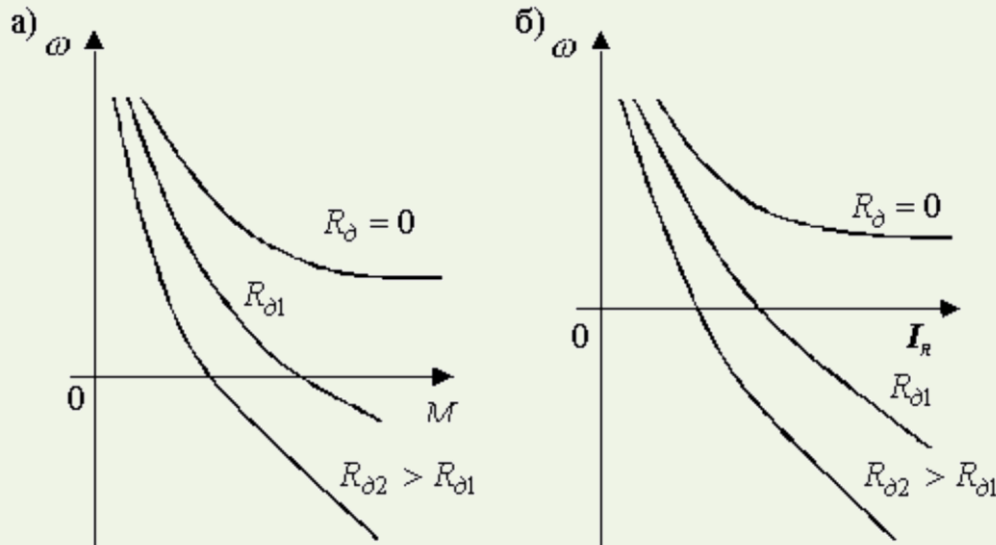
$$\omega = \frac{U_M}{kk_{\Phi}I_{\text{я}}} - \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{kk_{\Phi}}; \quad \omega = \frac{U_M}{\sqrt{kk_{\Phi}M}} - \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{kk_{\Phi}},$$

де $k_{\Phi} = \Phi/I_{\text{я}}$ – коефіцієнт пропорційності між магнітним потоком та струмом якоря.

При $I_{\text{я}} \geq I_{\text{гр}}$ магнітний потік $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$ і:

$$\omega = \frac{U_M}{k\Phi_{\text{нас}}} - \frac{I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_{\text{нас}}}; \quad \omega = \frac{U_M}{k\Phi_{\text{нас}}} - \frac{M(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k^2\Phi_{\text{нас}}^2}.$$

Швидкість ідеального холостого ходу $\omega_0 = \frac{U_M}{k\Phi_{\text{зал}}} = (8...10)\omega_{\text{н}}$.



Механічні (а) та електромеханічні характеристики (б) двигуна послідовного збудження

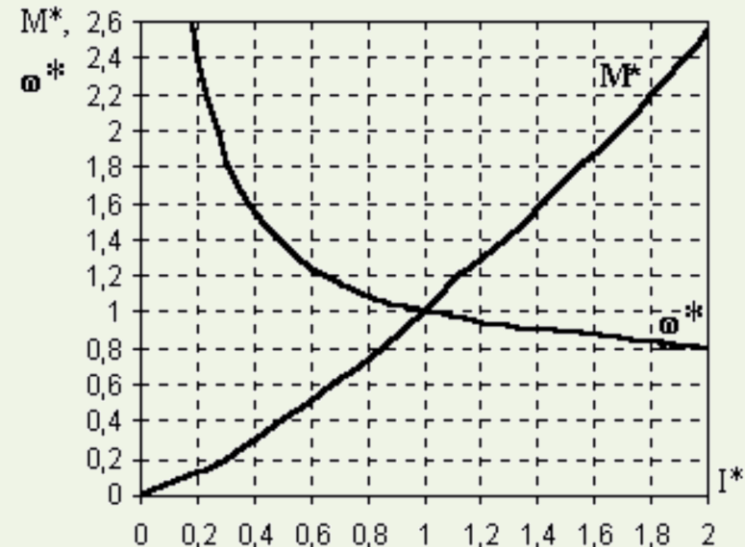
У режимі холостого ходу $\omega_{xx} = (4 \dots 6)\omega_n$.

Особливості механічних характеристик двигуна послідовного збудження:

- різке збільшення швидкості в режимі холостого ходу;
- при $I_{я} > I_n$ магнітне коло машини насичується, подальше збільшення струму призводить до незначного збільшення магнітного потоку і механічна характеристика стає майже лінійною.

Переваги двигуна послідовного збудження:

- розвиває більший пусковий момент, ніж двигун незалежного збудження;
- момент двигуна не залежить від коливань напруги мережі;
- менша чутливість до різких коливань напруги живлення;
- спад пускового струму відбувається швидше;
- при малих статичних навантаженнях двигун розвиває велику швидкість, а при великих автоматично знижує її.



Універсальні характеристики моментів та швидкості двигуна послідовного збудження в функції струму якоря

3.6. Побудова штучних характеристик двигуна послідовного збудження

Рівняння:

- природної характеристики
$$\omega_{пр} = \frac{U_M - I_{я} r_{я}}{k\Phi};$$
- штучної характеристики
$$\omega_{шт} = \frac{U_M - I_{я} (r_{я} + R_d)}{k\Phi}.$$

Тоді

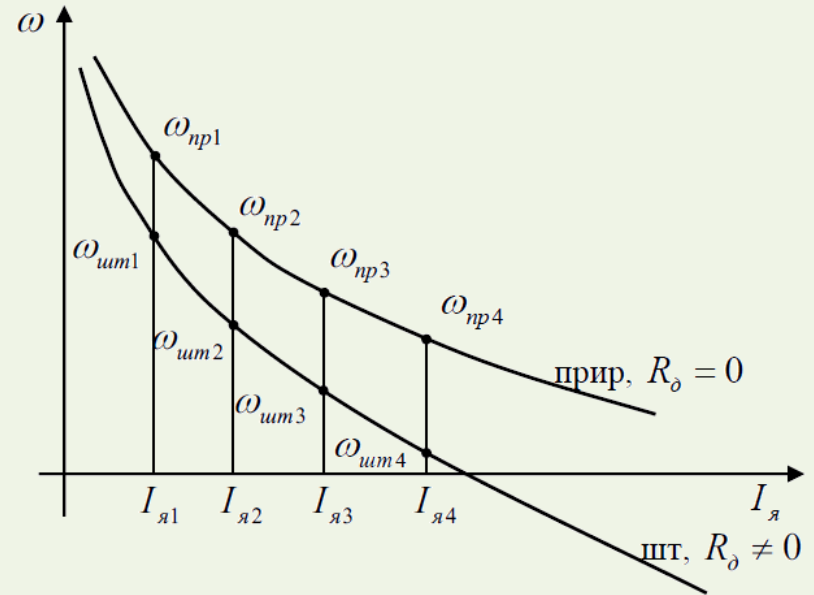
$$\omega_{шт} = \omega_{пр} \frac{U_M - I_{я}(r_{я} + R_d)}{U_M - I_{я}r_{я}}$$

Механічні характеристики при різних значеннях
напруги живлення

$$\omega_{шт} = \omega_{пр} \frac{U_{я.шт} - I_{я}r_{я}}{U_H - I_{я}r_{я}}$$

Значення додаткового опору, який потрібно
ввімкнути в коло якоря, для отримання
заданої швидкості

$$R_d = \frac{(U_M - I_{я}r_{я})(\omega_{пр} - \omega_{шт})}{\omega_{пр}I_{я}}$$



Природна та штучна характеристики двигуна послідовного збудження

3.7. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження в гальмівних режимах

Режим гальмування противмиканням (генераторний режим послідовно з мережею).

Додатковий опір

$$R_d = \frac{U_M + E_{дв}}{I_{доп}} - r_{я},$$

де $E_{дв} = U_M - I_c r_{я}$ – ЕРС двигуна в попередньому рушійному режимі; $I_{доп}$ – допустимий за умов комутації струм якоря, найчастіше $I_{доп} \leq (2 \dots 2,5) I_H$.

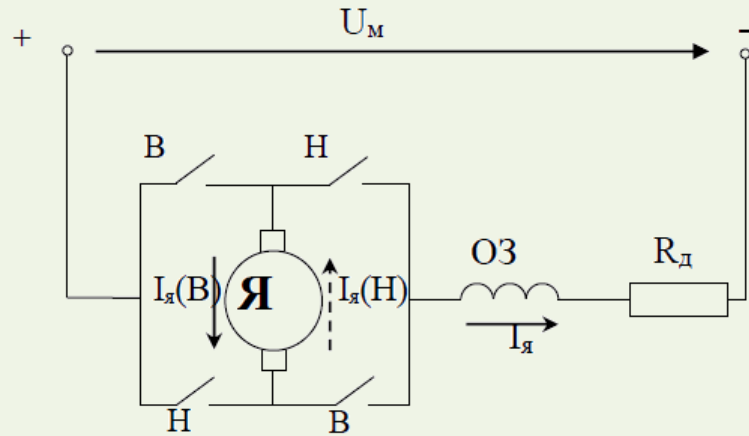
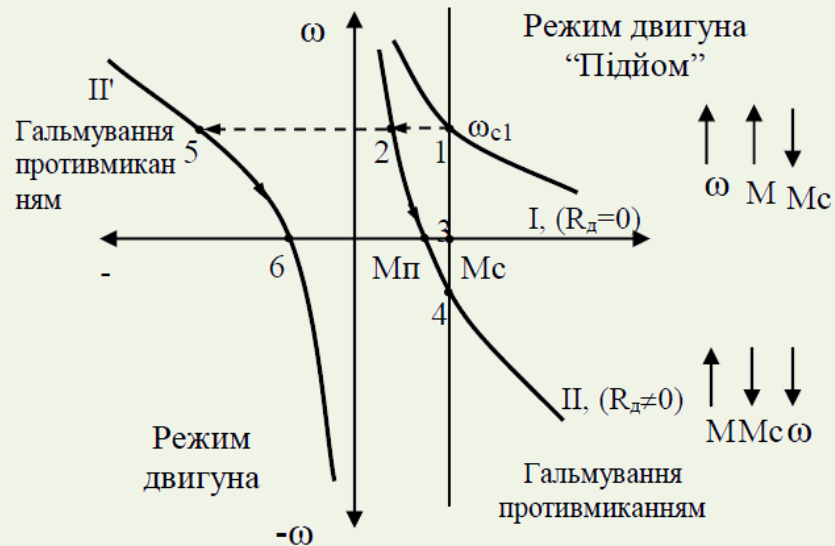


Схема вмикання двигуна послідовного збудження для реалізації гальмування противмиканням змінюючою полярності напруги, підведеної до якоря



Гальмування противмиканням двигуна послідовного збудження при активному моменті опору

Режим динамічного гальмування (генераторне гальмування незалежно від мережі)

Динамічне гальмуванням із самозбудженням

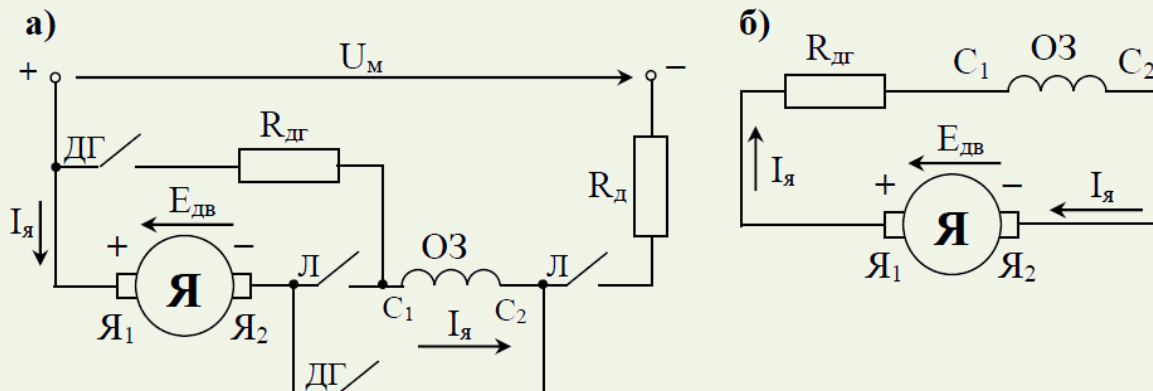
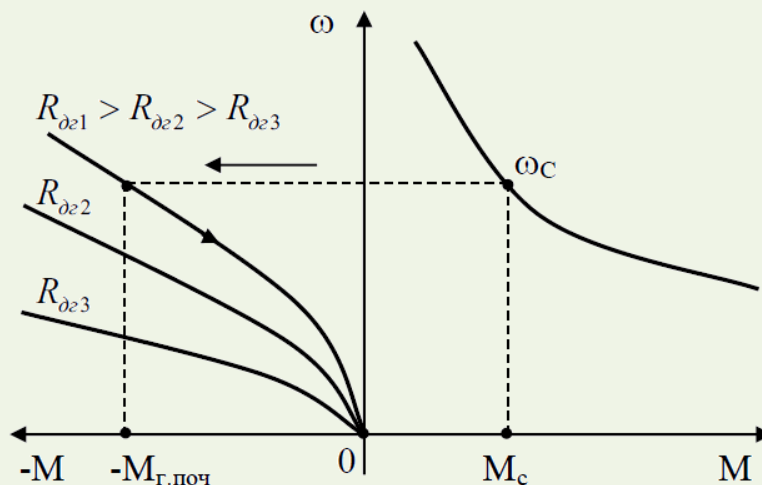


Схема перемикання обмоток двигуна послідовного збудження для реалізації режиму динамічного гальмування із самозбудженням: а – режим двигуна (увімкнені контактори Л і розімкнені – ДГ); б – динамічне гальмування (розімкнені Л та ввімкнені ДГ)



Механічні характеристики динамічного гальмування двигуна послідовного збудження із самозбудженням

Побудова механічних характеристик у режимі динамічного гальмування

Потужність, що розвивається двигуном

$$I_{\text{я}}^2 (r_{\text{я}} + R_{\text{дг}}) = M\omega,$$

звідки

$$\omega = \frac{I_{\text{я}}^2 (r_{\text{я}} + R_{\text{дг}})}{M}.$$

Динамічне гальмуванням із незалежним збудженням

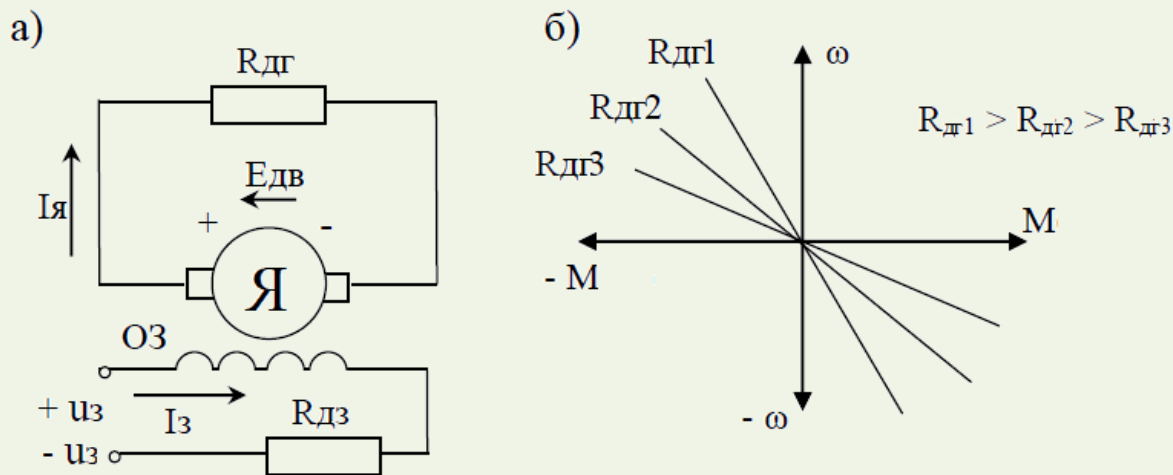


Схема вмикання (а) та механічні характеристики (б) у режимі динамічного гальмування двигуна послідовного збудження з незалежним збудженням

Додатковий опір

$$R_{\text{дз}} = \frac{U_3}{I_{3,\text{н}}} - r_{0,3}.$$

3.8. Динамічні властивості двигуна послідовного збудження

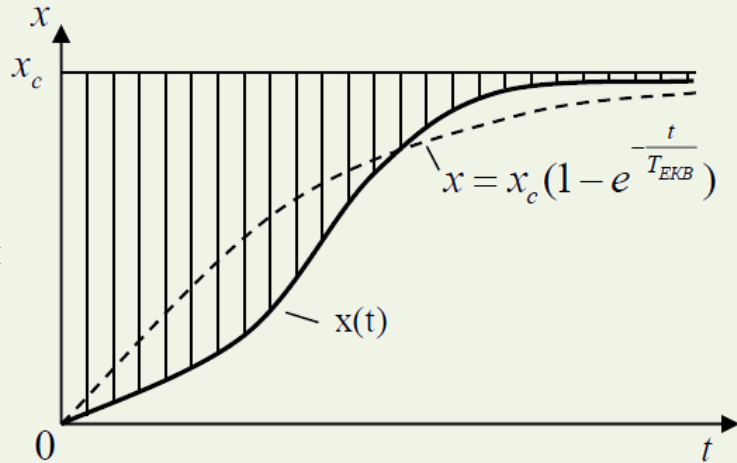
Узагальнена або еквівалентна стала часу

$$T_{\text{екв}} = \frac{1}{x_y} \int_0^{\infty} (x_c - x(t)) dt.$$

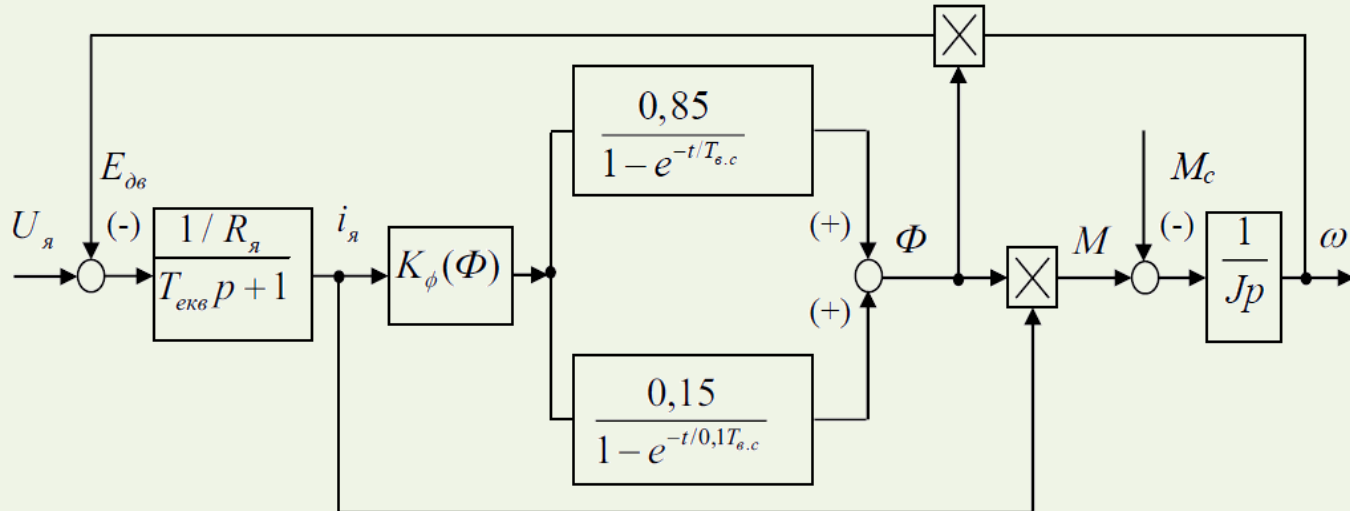
Рівняння електричної рівноваги обмотки збудження

$$U_3 = i_3 R_3 + \frac{d\psi_3}{dt},$$

де ψ_3 – повне потокозчеплення обмотки збудження.



Визначення еквівалентної сталої часу нелінійної ланки



Структурна схема двигуна послідовного збудження з шихтованою станиною на базі еквівалентної (узагальненої) сталої часу якірного кола $T_{\text{екв}}$

3.9. Механічні характеристики ДПС змішаного збудження

Граничне значення струму якоря

$$-I_{\text{я.гр}} = \frac{I_{\text{з.н}} W_{\text{з.н}}}{W_{\text{з.п}}}$$

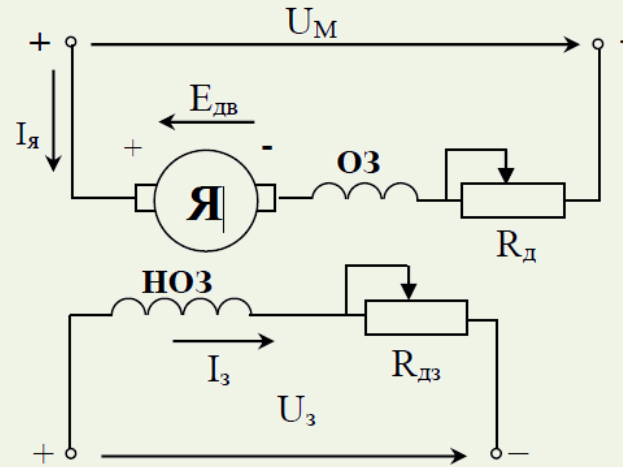
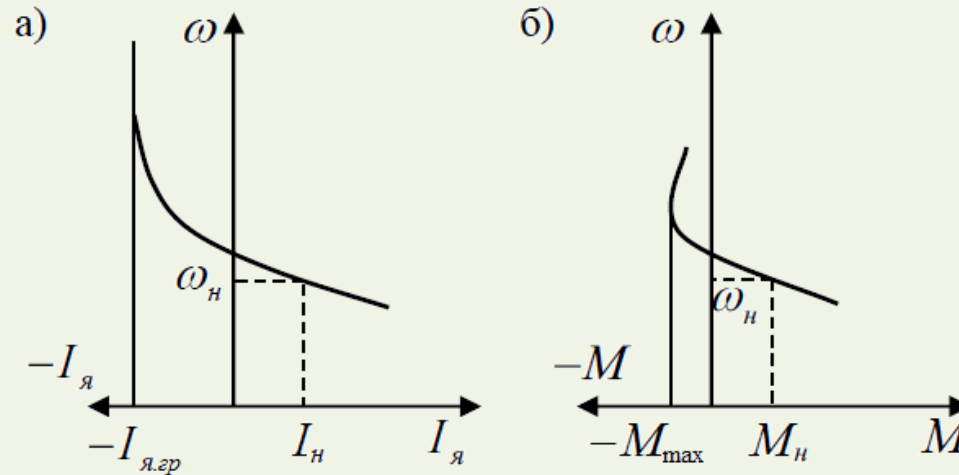


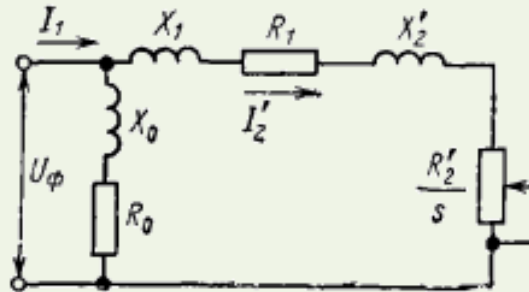
Схема вмикання двигуна постійного струму змішаного збудження



Електромеханічна (а) та механічна (б) характеристики двигуна змішаного збудження

4. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

4.1. Механічні характеристики асинхронного двигуна



Спрощена схема заміщення асинхронного двигуна

U_ϕ – фазна напруга; I_1 – фазний струм статора; I_2' – приведений струм ротора; X_1 , X_2' – опори розсіювання статора і ротора (приведений); R_0 , X_0 – активний і реактивний опори контуру намагнічування; $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – ковзання; $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ – синхронна кутова швидкість поля; R_1 ; R_2' – активні опори обмоток статора і ротора; f_1 – частота мережі; p – кількість пар полюсів.

Струм обмотки ротора

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

З виразу для електричних втрат $M\omega_0 s = 3(I'_2)^2 R'_2$, звідки

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}.$$

Механічна характеристика

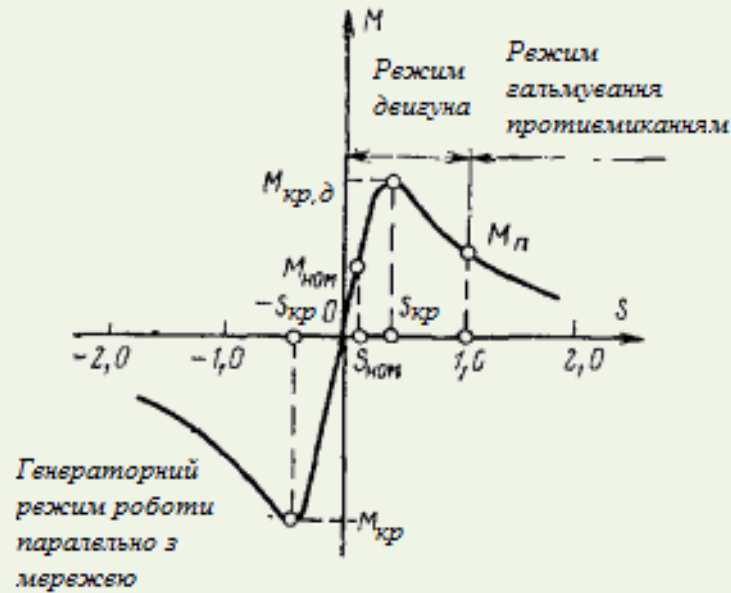
$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 \left((R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right) s}.$$

Критичне ковзання

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

Максимальний момент

$$M_{кр} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right)}.$$

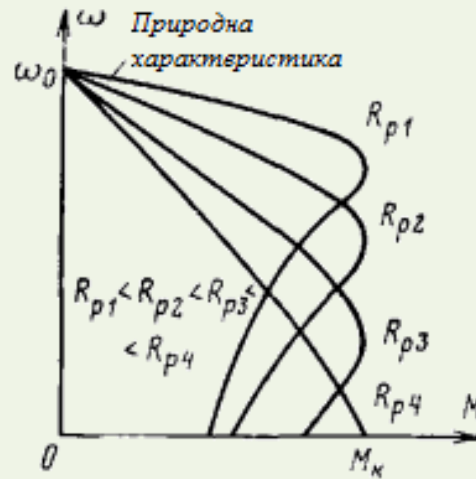


Механічна характеристика асинхронного двигуна

Формула Клосса

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}},$$

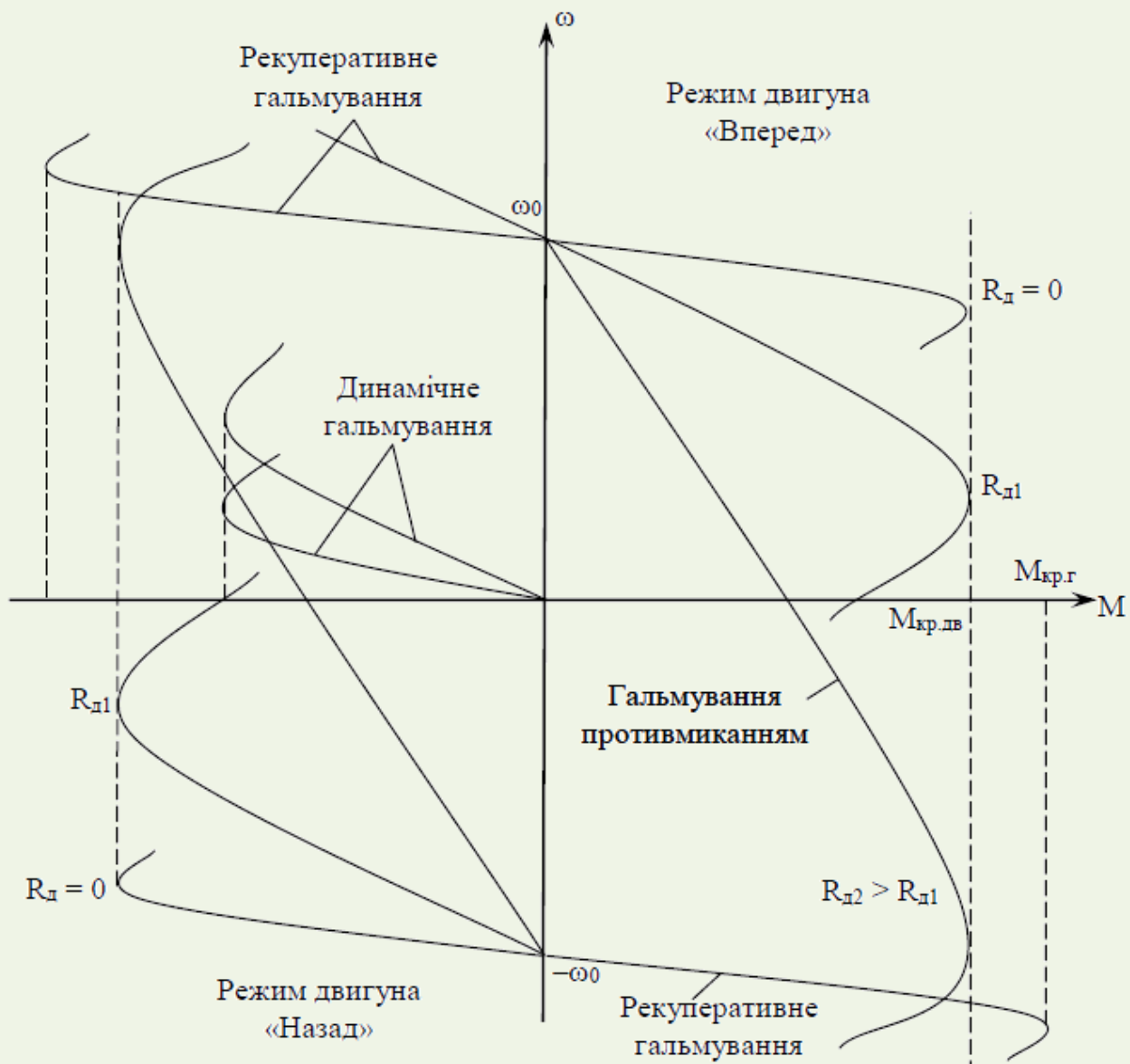
де $s_{кр} = s_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right)$ – критичне ковзання; $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$ – кратність максимального моменту.



Природна і штучні механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

4.2. Механічні характеристики асинхронного двигуна в гальмівних режимах

1. Гальмування з віддачею енергії в мережу.
2. Гальмування противмиканням.
3. Динамічне гальмування.



Механічні характеристики асинхронного двигуна для різних режимів роботи

Потокозчеплення статора

$$\dot{\psi}_1 = \dot{I}_1 L_{1\sigma} + \dot{I}_0 L_0 = \dot{I}_1 L_{1\sigma} + L_0 (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = (L_0 + L_{1\sigma}) \dot{I}_1 + L_0 \dot{I}'_2 = L_1 \dot{I}_1 + L_0 \dot{I}'_2.$$

Потокозчеплення ротора

$$\dot{\psi}_2 = L_2 \dot{I}'_2 + L_0 \dot{I}_1,$$

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_0$ – повна індуктивність обмотки статора; $L_2 = L_{2\sigma} + L_0$ – повна індуктивність обмотки ротора.

Рівняння електричної рівноваги

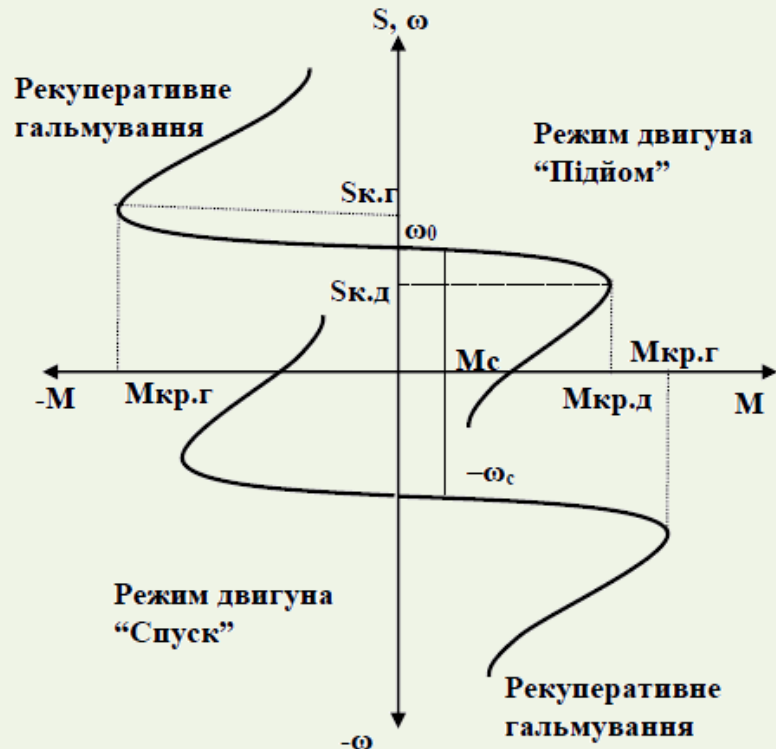
$$\dot{U}_1 = \frac{d\dot{\psi}_1}{dt} + \dot{I}_1 r_1 = j\omega_1 \dot{\psi}_1 + \dot{I}_1 r_1;$$

$$0 = \frac{d\dot{\psi}_2}{dt} + \dot{I}'_2 R'_2 / s = j\omega_1 \dot{\psi}_2 + \dot{I}'_2 R'_2 / s.$$

4.4. Гальмування противмиканням асинхронного двигуна

Ковзання

$$s = \frac{\omega_0 - (-\omega)}{\omega_0} > 1.$$



Механічні характеристики асинхронного двигуна в режимі рекуперативного гальмування

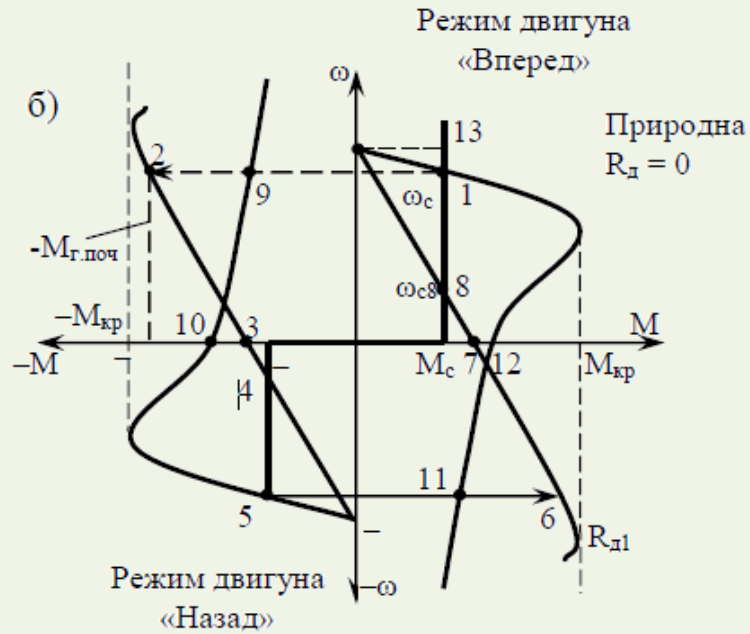
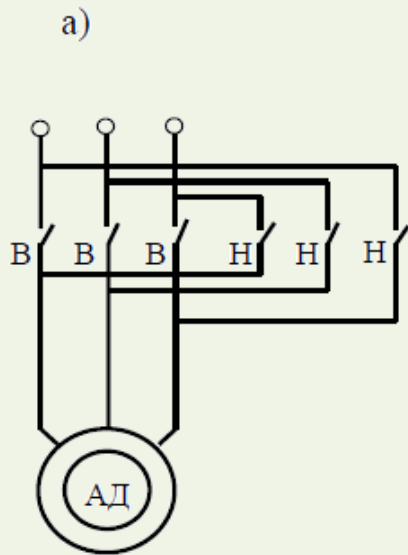
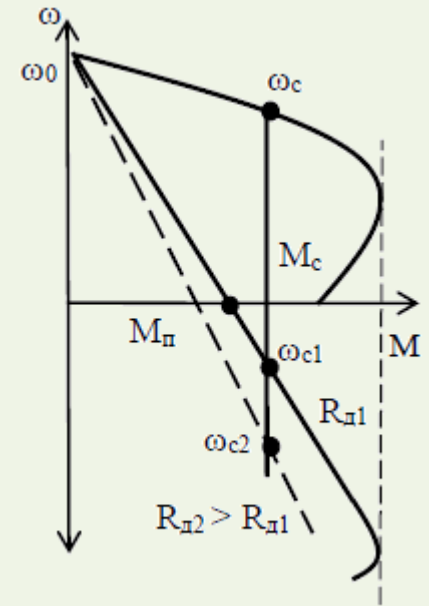


Схема вмикання (а) та механічні характеристики (б) при гальмуванні противмиканням механізмів з реактивним моментом опору

Додатковий опір

$$R_d = r_2 (s_{кр.шт} / s_{кр.пр} - 1)$$



Механічні характеристики в режимі гальмування противмиканням при спуску вантажу

4.5. Динамічне гальмування асинхронного двигуна

Еквівалентна МРС

$$F_{\text{екв}} = F_{\Sigma\Pi}.$$

МРС, створювана змінним трифазним струмом

$$F_{1.m} = \frac{3}{2} I_{1.m} w_1 = \frac{3}{\sqrt{2}} I_1 w_1.$$

Для еквівалентного струму

$$F_{\text{екв}} = \frac{3}{\sqrt{2}} I_{\text{екв}} w_1. \quad I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2} F_{\Sigma\Pi}}{3 w_1}.$$

Для першої схеми

$$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\Pi} = 0,816 I_{\Pi}.$$

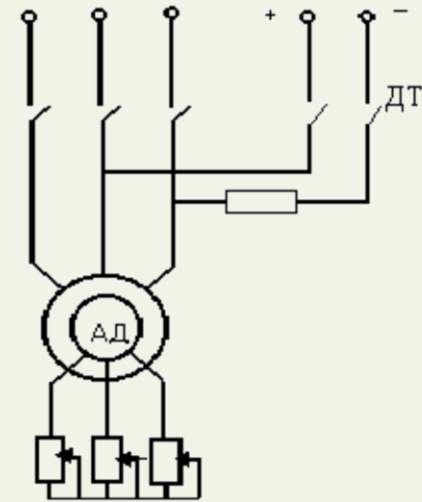
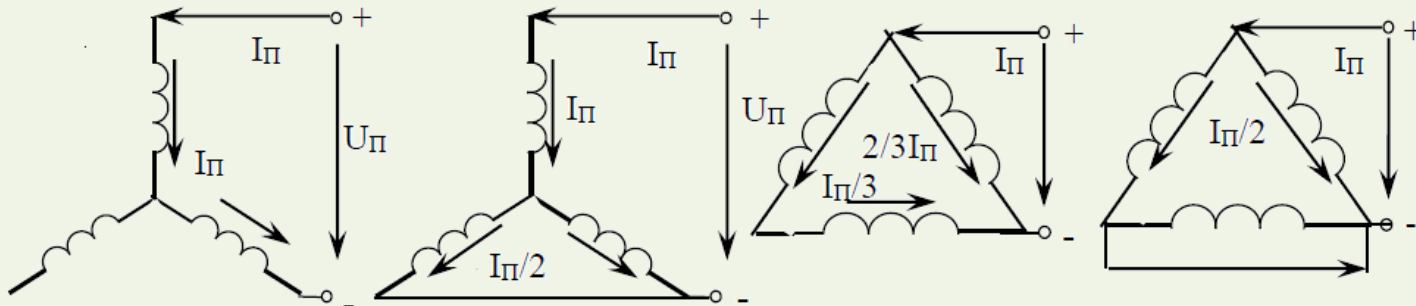


Схема вмикання асинхронного двигуна для реалізації режиму динамічного гальмування



Варіанти основних схем вмикання обмоток статора асинхронного двигуна на постійну напругу в режимі динамічного гальмування

Електромагнітний момент

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}$$

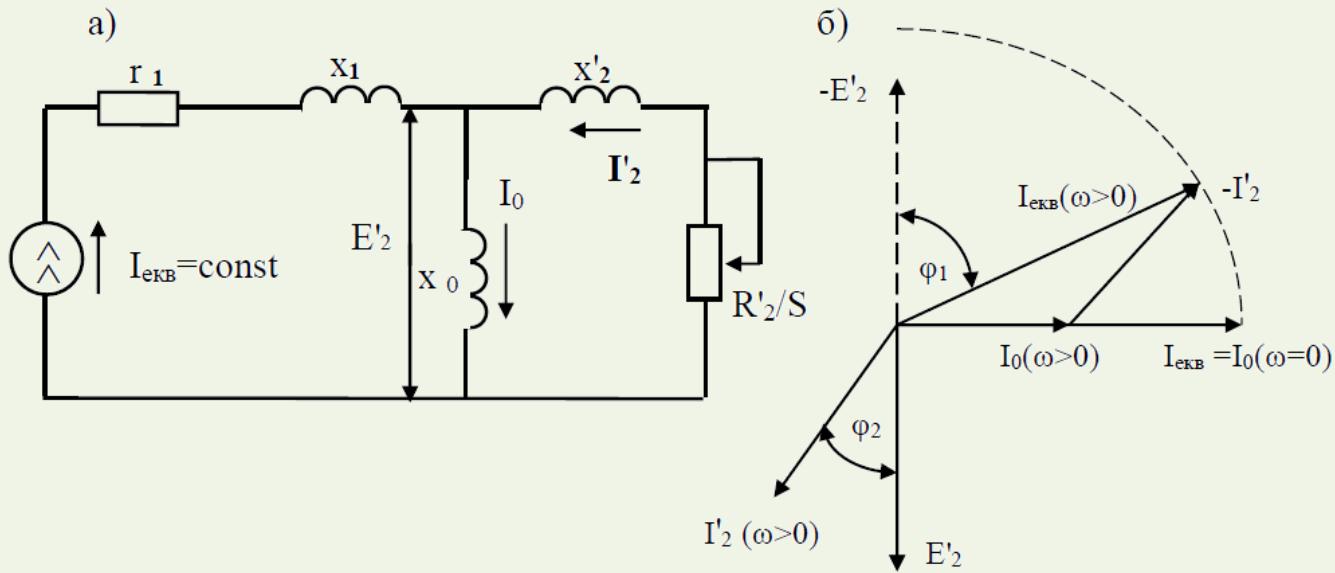


Схема заміщення фази (а) і векторна діаграма (б) асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування (живлення від джерела струму)

Згідно з векторною діаграмою

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{екв}} \cos \varphi_1 &= I'_2 \cos \varphi_2; \\ I_{\text{екв}} \sin \varphi_1 &= I_0 + I'_2 \sin \varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad I_{\text{екв}}^2 = I'_2{}^2 + I_0^2 + 2I_0 I'_2 \sin \varphi_2.$$

Згідно зі схемою заміщення

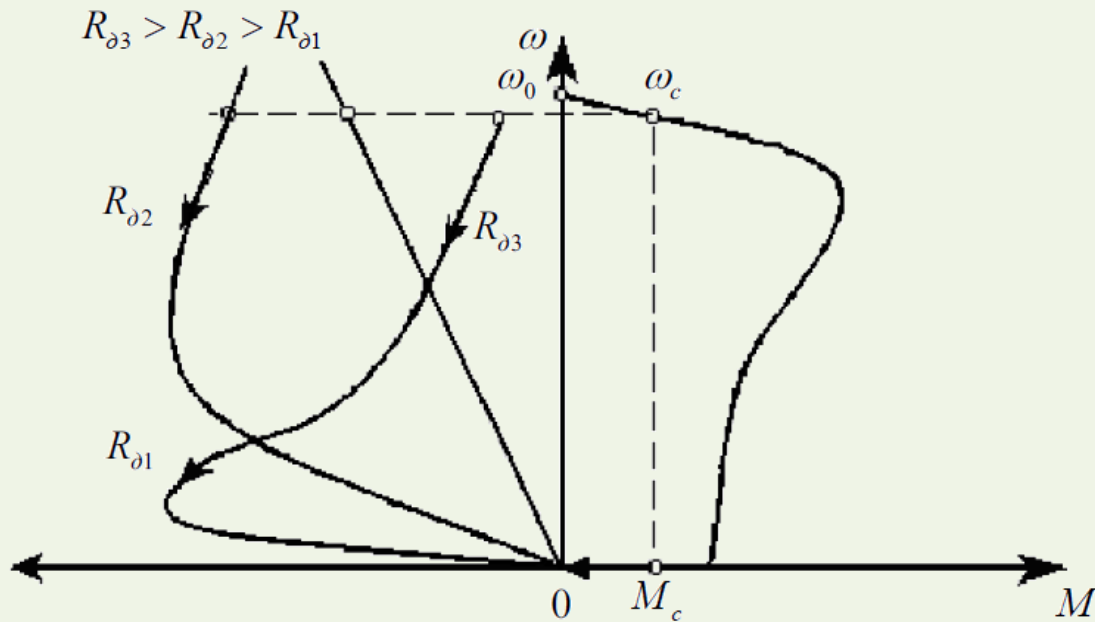
$$I_0 = \frac{E'_2}{x_0} = \frac{I'_2 \sqrt{x_2'^2 + (R'_2/s)^2}}{x_0} = \frac{I'_2 Z'_2}{x_0}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{x'_2}{Z'_2}.$$

Струм ротора

$$I'_2 = \frac{I_{\text{екв}} s x_0}{\sqrt{R_2'^2 + s^2(x_0 + x_2')^2}},$$

Рівняння механічної характеристики

$$M = \frac{3I_{\text{екв}}^2 x_0^2 R_2' s}{\omega_0 (R_2'^2 + s^2(x_0 + x_2')^2)}.$$



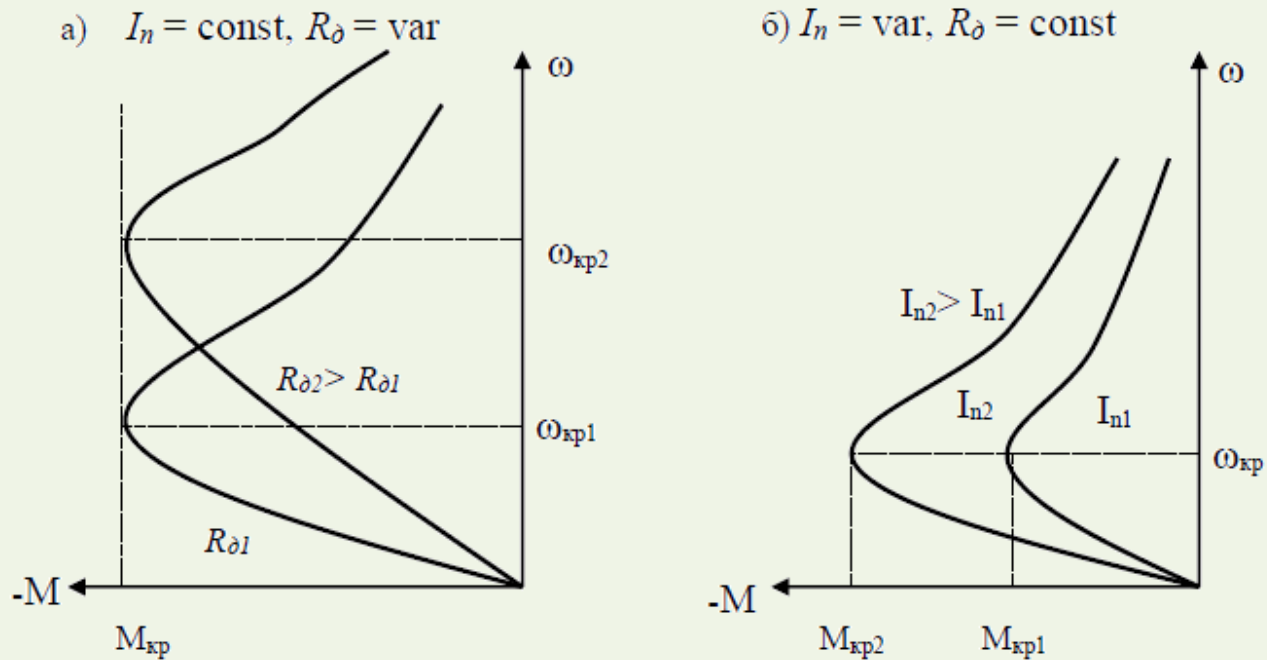
Характеристики асинхронного двигуна при перемиканні $\omega = f(M)$ з рушійного режиму на динамічне гальмування

Критичне ковзання

$$s_{\text{кр}} = \frac{R_2'}{x_0 + x_2'}.$$

Критичний момент

$$M_{\text{кр}} = \frac{3I_{\text{екв}}^2 x_0^2}{2\omega_0(x_0 + x_2')}.$$



Механічні характеристики асинхронного двигуна у режимі динамічного гальмування

Механічна характеристика при динамічному гальмуванні

$$M = \frac{2M_{кр}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}$$

4.6. Підвищення енергетичних показників асинхронних двигунів

Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}},$$

де $P = M\omega_0 + 3I_1^2 R_1$ – активна потужність; $Q = 3I_0^2 x_0 + 3I_1^2 x_1 + 3I_2^2 x_2'$ – реактивна потужність; S – повна потужність.

Основні заходи для підвищення $\cos\phi$ асинхронних двигунів:

заміна малозавантажених двигунів на двигуни меншої потужності;

обмеження роботи асинхронних двигунів на холостому ході;

зниження напруги живлення двигунів, працюючих з малим навантаженням, шляхом застосування системи регулятор напруги – АД;

заміна асинхронних приводів з реостатним регулюванням швидкості частотно-регульованими.

5. МЕХАНІЧНА ТА КУТОВА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

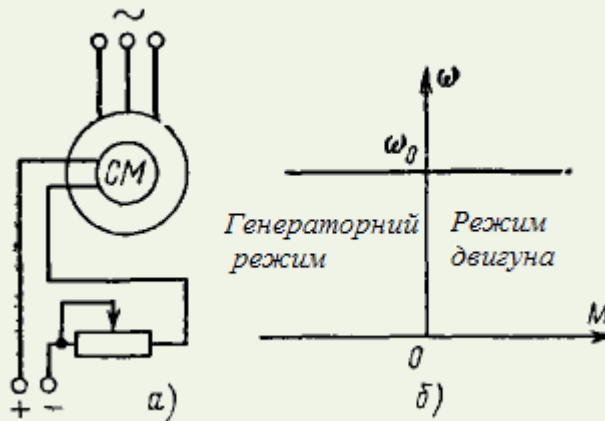
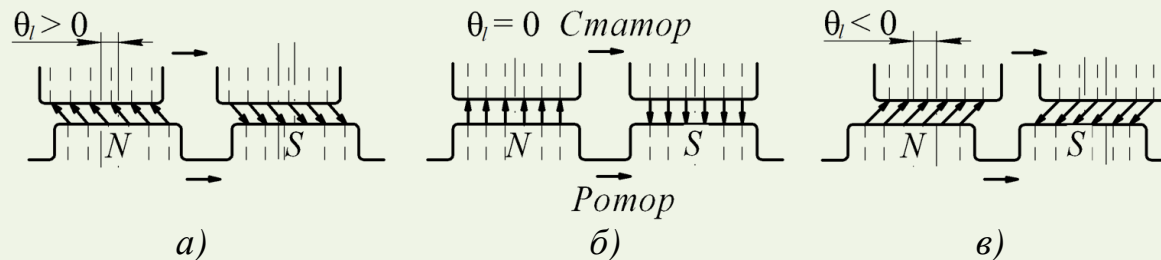


Схема вмикання (а) і механічна характеристика (б) синхронного двигуна

Кутлова швидкість синхронного двигуна

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

Три основних способи пуску СД: пуск за допомогою допоміжного двигуна, частотний пуск та асинхронний пуск.



Режими роботи синхронної машини

$M(\theta_l)$ – кутова характеристика синхронної машини.

Електромагнітний момент

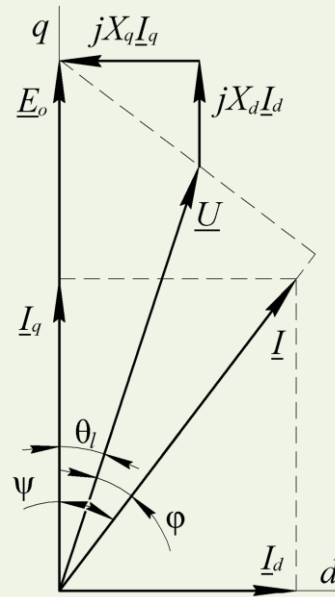
$$M = \frac{P_e}{\omega_0} = \frac{m}{\omega_0} UI \cos \varphi,$$

де m – кількість фаз обмотки статора; P_e – електромагнітна потужність; U, I – відповідно напруга та струм двигуна; φ – кут між ними.

Рівняння рівноваги напруг (для режиму генератора)

$$\underline{E}_o = \underline{U} + jX_d \underline{I}_d + jX_q \underline{I}_q,$$

де \underline{E}_o – ЕРС обмотки статора індуквана магнітним потоком обмотки збудження; $X_d = X_{sd} + X_l$ – повний або синхронний індуктивний опір обмотки якоря по поздовжній осі; $X_q = X_{sq} + X_l$ – повний індуктивний опір обмотки якоря по поперечній осі; X_{sd} – індуктивний опір поздовжньої реакції якоря; X_{sq} – індуктивний опір поперечної реакції якоря; X_l – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; I_d, I_q – проекції узагальненого вектора струму статора на осі d і q .



*Спрощена векторна
діаграма явнополюсного
синхронного генератора*

Електромагнітна потужність

$$P_e = mUI \cos(\psi - \theta_l) = mUI (\sin \psi \sin \theta_l + \cos \psi \cos \theta_l),$$

або

$$P_e = mU (I_d \sin \theta_l + I_q \cos \theta_l),$$

де $I \sin \psi = I_d$, $I \cos \psi = I_q$.

З векторної діаграми

$$E_o = U \cos \theta_l + I_d X_d;$$

$$U \sin \theta_l = I_q X_q,$$

звідки

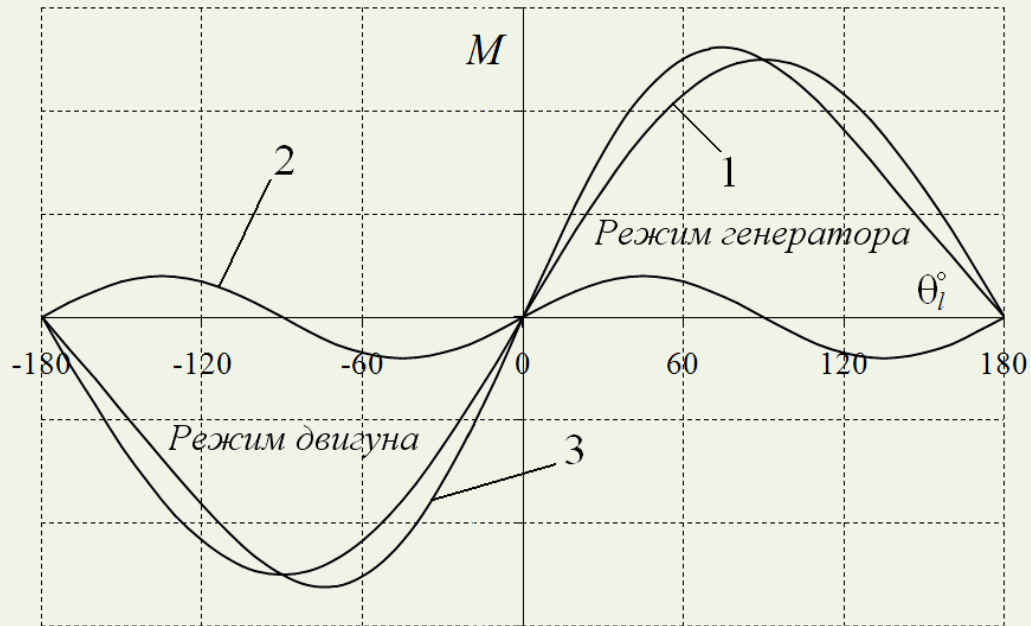
$$I_d = \frac{E_o - U \cos \theta_l}{X_d}; \quad I_q = \frac{U \sin \theta_l}{X_q}.$$

Електромагнітний момент явнополюсної синхронної машини

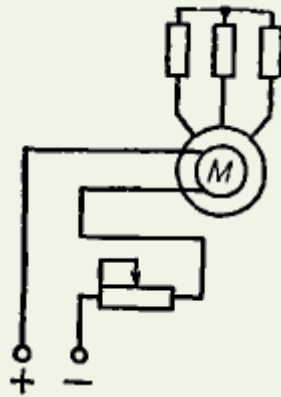
$$M = \frac{P_e}{\omega_0} = \frac{mUE_o \sin \theta_l}{\omega_0 X_d} + \frac{mU \sin 2\theta_l}{2\omega_0} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right).$$

Електромагнітний момент неявнополюсної синхронної машини

$$M = \frac{P_e}{\omega_0} = \frac{mUE_o \sin \theta_l}{\omega_0 X_d}.$$



Кутова характеристика синхронної машини



Принципова схема вмикання синхронного двигуна при динамічному гальмуванні

6. РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

6.1. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Регулюванням швидкості називають примусову зміну швидкості електропривода залежно від вимог технологічного процесу.

Основні показники регулювання швидкості.

1. Діапазон регулювання.

$$D = \omega_{\max} : \omega_{\min},$$

де ω_{\max} – максимальна швидкість; ω_{\min} – мінімальна швидкість.

2. Плавність.

Плавність характеризує стрибок швидкості при переході до найближчої можливої швидкості.

$$\varphi_{\text{пл}} = \omega_i / \omega_{i-1},$$

де ω_i, ω_{i-1} – кутові швидкості відповідно на i -й та $(i-1)$ -й ступенях регулювання.

$$D = \varphi_{\text{пл}}^{z-1},$$

де z – кількість швидкостей.

3. Економічність.

Економічність регулювання характеризується витратами на спорудження та експлуатацію електропривода.

Середньозважений ККД за цикл регулювання

$$\eta_p = \frac{\sum_1^m P_{2q} t_q}{\sum_1^m (P_{2q} + \Delta P_q) t_q},$$

де P_{2q} , ΔP_q – відповідно корисна потужність і втрати на q -у ступені регулювання; t_q – час впродовж якого двигун працює на q -у ступені; m – кількість ступенів регулювання.

Середньозважений $\cos \varphi_p$ за цикл регулювання

$$\cos \varphi_p = \frac{\sum_1^m P_{aq} t_q}{\sum_1^m (\sqrt{P_{aq}^2 + P_{pq}^2}) t_q},$$

де P_{aq} , P_{pq} – відповідно активна та реактивна потужності на q -у ступені регулювання.

4. Стабільність швидкості.

Стабільність кутової швидкості

характеризується зміною швидкості при заданому відхиленні моменту навантаження.

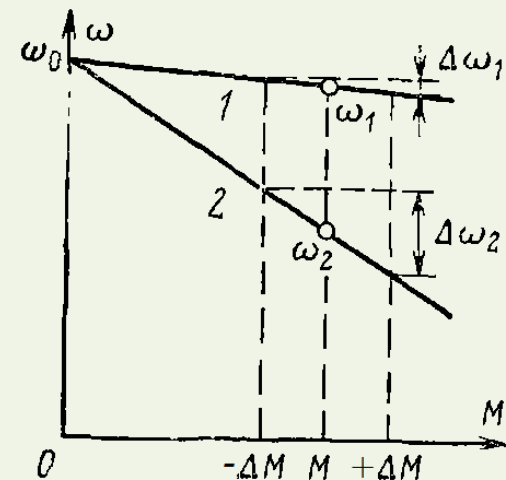
5. Напрямок регулювання швидкості.

Розрізняють однозонне регулювання

вниз від основної швидкості, однозонне

регулювання вгору від основної швидкості

і двохзонне регулювання.



Зміна кутової швидкості для механічних характеристик різної жорсткості

6. Допустиме навантаження на різних швидкостях.

Допустимий момент двигуна постійного струму

$$M_{\text{доп}} = k\Phi I_{\text{ном}}.$$

6.2. РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ЗМІНОЮ МАГНІТНОГО ПОТОКУ

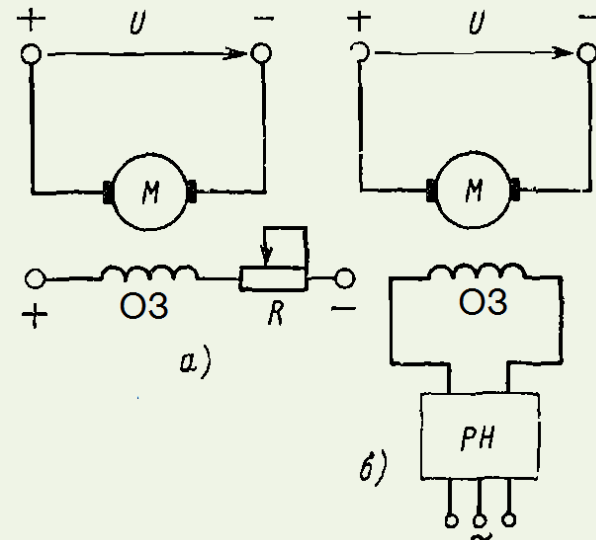
Рівняння електромеханічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}.$$

Три способи регулювання кутової швидкості:

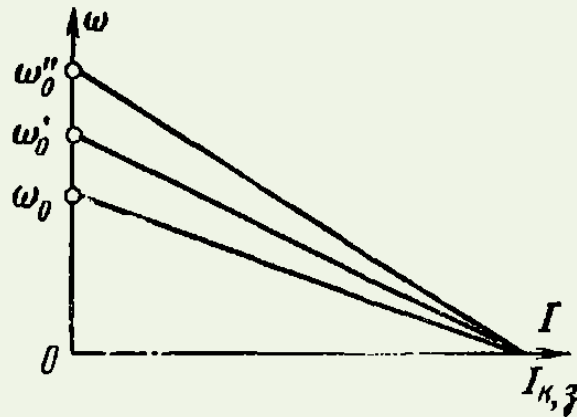
- 1) зміною магнітного потоку збудження;
- 2) зміною опору кола якоря за допомогою резисторів;
- 3) зміною напруги якоря.

Принципові схеми електропривода при регулюванні кутової швидкості зміною магнітного потоку за допомогою резистора (а) та регулятора напруги (б)

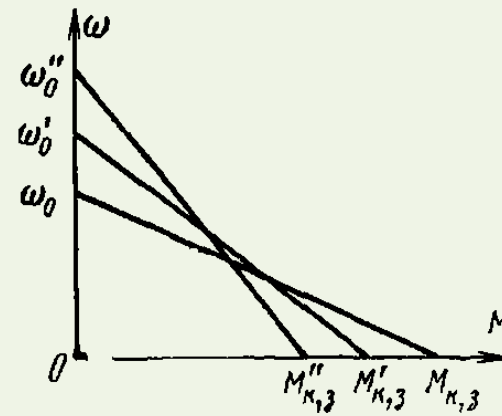


Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}.$$



а)



б)

Електромеханічні (а) та механічні (б) характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні кутової швидкості струмом збудження

Оскільки $0 = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}$, то $I = \frac{U}{R} = I_{кз}$.

Момент короткого замикання

$$M_{к.з.} = kI_{к.з.}\Phi.$$

6.3. РЕОСТАТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ

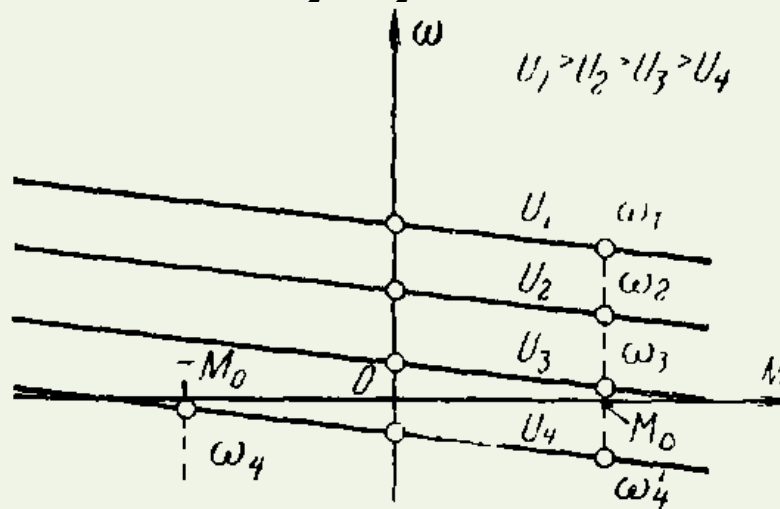
6.4. РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ ЗМІНОЮ НАПРУГИ ЯКОРА

Для різних значень напруги якоря кутова швидкість дорівнює:

$$\omega_1 = \frac{U_1 - IR}{k\Phi}; \quad \omega_2 = \frac{U_2 - IR}{k\Phi},$$

тоді їх відношення

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 - IR}{U_2 - IR}.$$



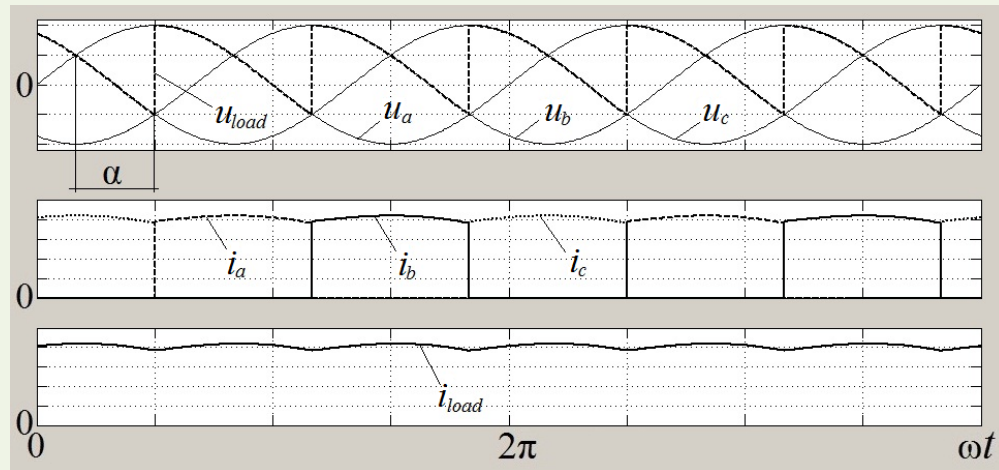
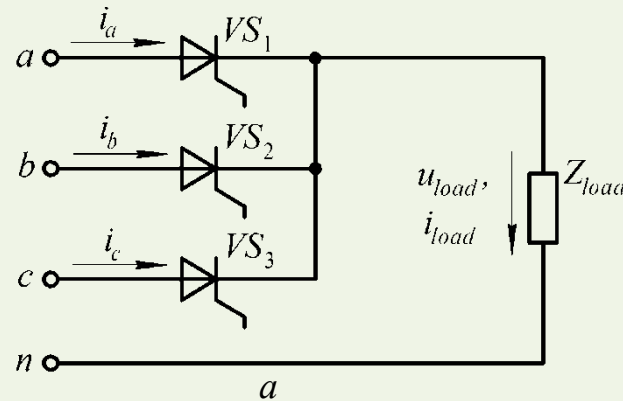
Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при різних напругах

Діапазон регулювання

$$D = \frac{U_{\text{ном}} - IR}{U_{\text{мін}} - IR},$$

де $U_{\text{ном}}$ і $U_{\text{мін}}$ – номінальна і мінімальна напруги.

6.4.1. Регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження зміною напруги на якорі за допомогою керованих випрямлячів



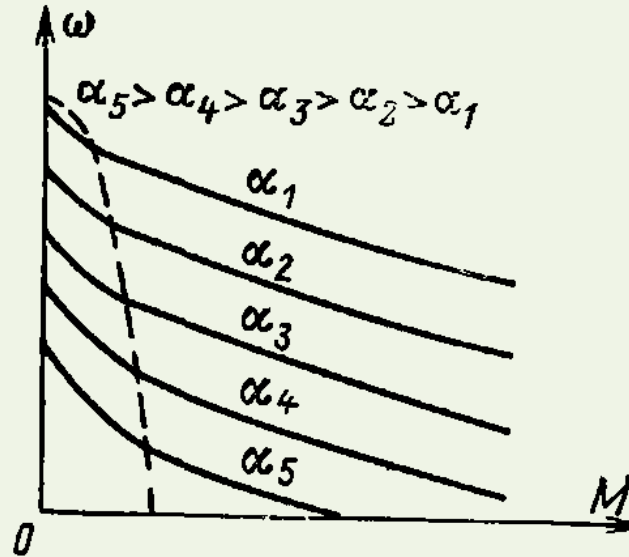
б

Трифазний керований випрямляч: а – принципова схема; б – осцилограми напруг та струмів при активно-індуктивному навантаженні й $\alpha = 60^\circ$

Середнє значення випрямленої напруги

$$U_{av.load} = 0,827U_m \cos \alpha.$$

де α – кут керування.



Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при живленні від тиристорного керованого випрямляча

6.4.2. Регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження зміною напруги на якорі за допомогою широтно-імпульсних перетворювачів

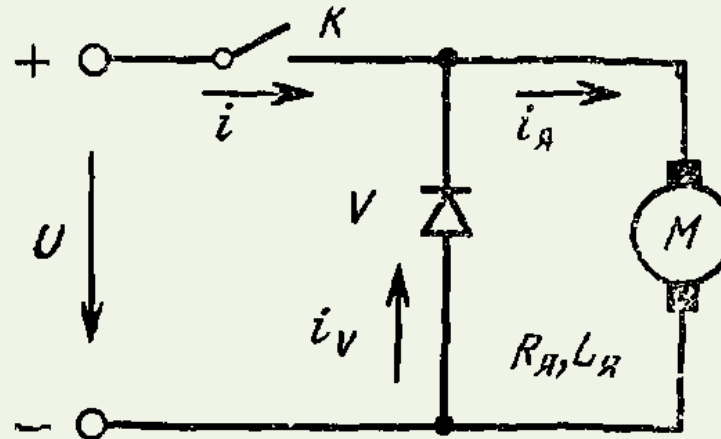
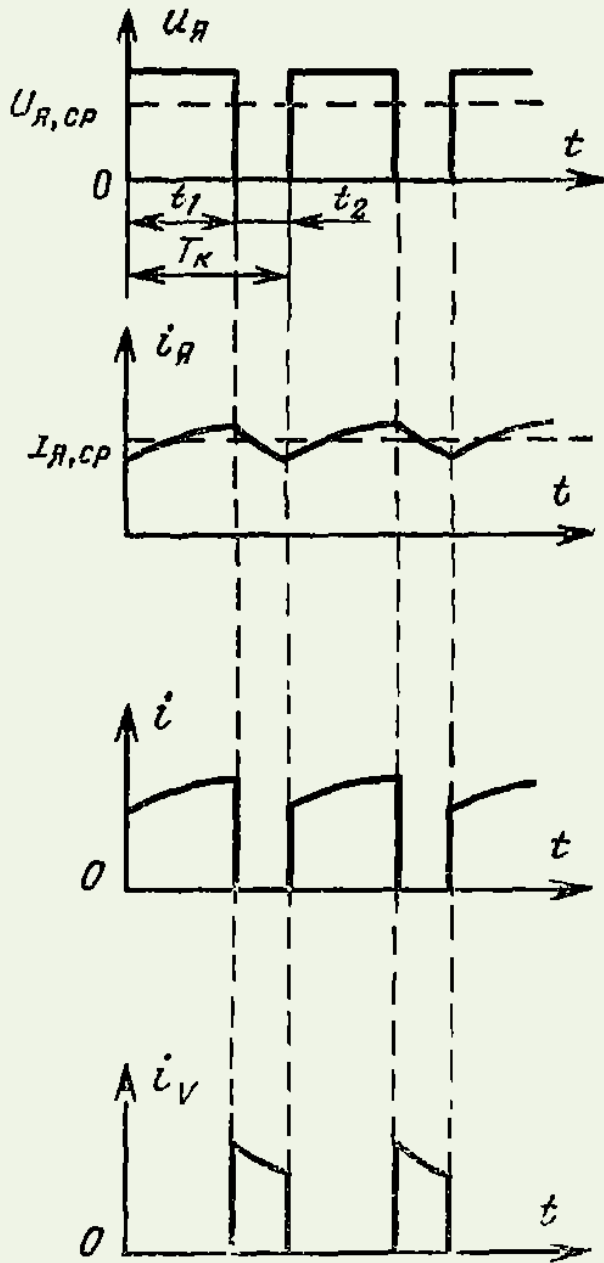


Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження при імпульсному регулюванні напруги на якорі

Середнє значення напруги на якорі

$$U_{\text{я.ср}} = \frac{1}{T_{\text{к}}} \int_0^{T_{\text{к}}} i_{\text{я}} R_{\text{я}} dt = \frac{t_1}{T_{\text{к}}} U = f_{\text{к}} t_1 U = \varepsilon U,$$

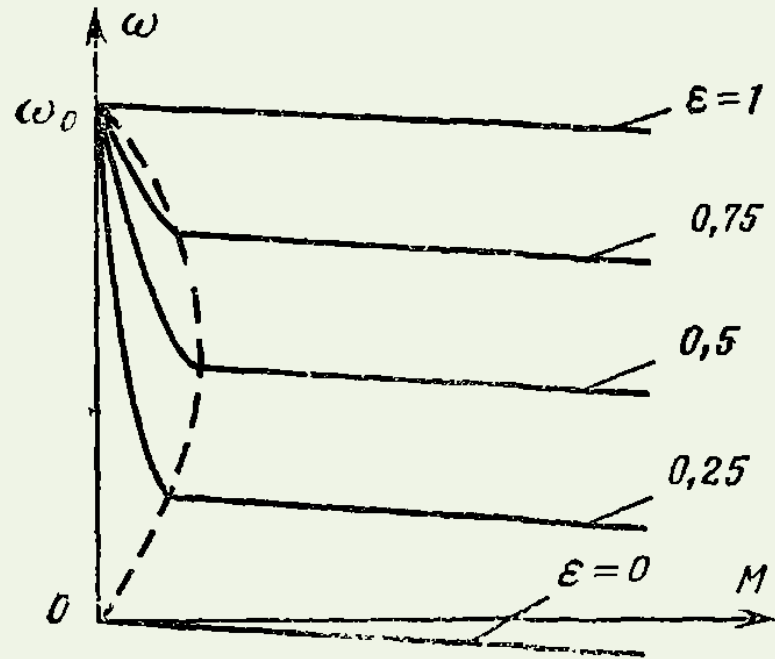
де $T_{\text{к}} = t_1 + t_2$ – період імпульсів; t_1 – тривалість замкненого стану ключа; t_2 – тривалість розімкненого стану ключа; $i_{\text{я}}$ – струм якоря; $R_{\text{я}}$ – опір якоря; $f_{\text{к}} = 1/T_{\text{к}}$ – частота комутації; U – значення вхідної напруги; $\varepsilon = t_1/T_{\text{к}}$ – коефіцієнт заповнення.



Діаграми напруг і струмів

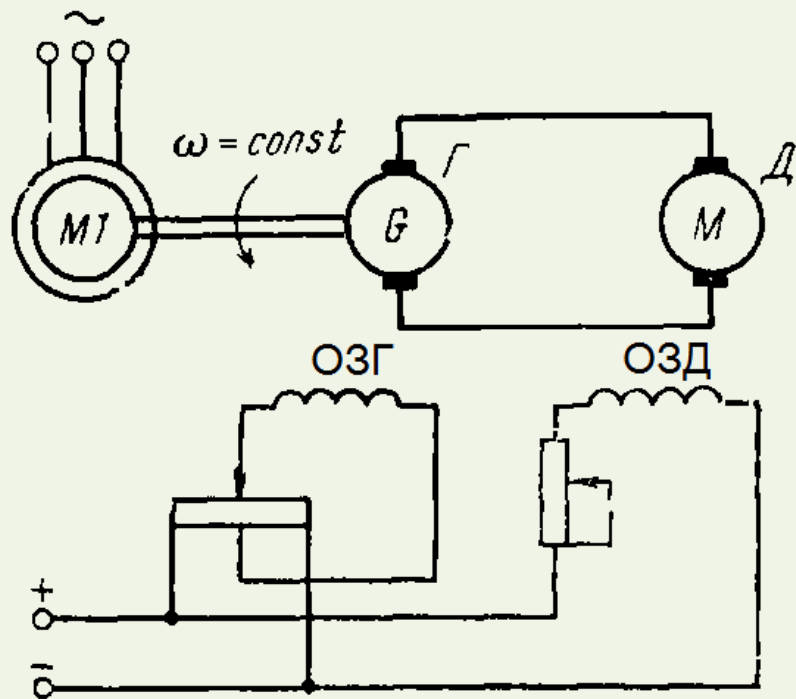
Рівняння механічної характеристики для середніх значень кутової швидкості і моменту

$$\omega_{cp} = \frac{\varepsilon U}{k\Phi} - \frac{M_{cp} R_{я}}{(k\Phi)^2}$$



Механічні характеристики двигуна

6.4.3. Система генератор-двигун



Принципова схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження по системі Г-Д

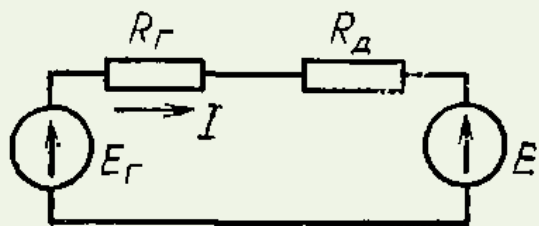


Схема заміщення

Рівняння рівноваги

$$E_2 - E = I(R_2 + R_\partial),$$

або

$$E_2 - k\Phi\omega = I(R_2 + R_\partial),$$

де E і I – відповідно ЕРС двигуна і струм якоря; R_2 , R_∂ – опір якоря генератора і двигуна відповідно.

Кутова швидкість двигуна

$$\omega = \frac{E_2}{k\Phi} - \frac{I(R_2 + R_\partial)}{k\Phi}.$$

Рівняння механічної характеристики

$$\omega = \frac{E_2}{k\Phi} - \frac{M(R_2 + R_\partial)}{k^2\Phi^2}.$$

6.5. Регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження

Рівняння електромеханічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}.$$

Три способи регулювання кутової швидкості:

- 1) зміною струму збудження;
- 2) зміною опору кола якоря за допомогою резисторів;
- 3) зміною напруги живлення.

6.6. Регулювання кутової швидкості електроприводів змінного струму

Способи регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна:

- 1) зміна частоти напруги живлення;
- 2) перемикання кількості полюсів;
- 3) реостатне регулювання;
- 4) каскадне вмикання асинхронного двигуна з іншими машинами чи перетворювачами.

6.7. Реостатне й імпульсне параметричне регулювання кутової швидкості асинхронного електропривода

Допустимий момент асинхронного двигуна із самовентиляцією

$$M_{\text{доп}} \approx M_{\text{ном}} \sqrt{\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}}$$

Недоліки реостатного регулювання:

- 1) дискретна зміна опору в колі ротора і ступінчасте регулювання швидкості;
- 2) невисока швидкодія;
- 3) великі втрати енергії.

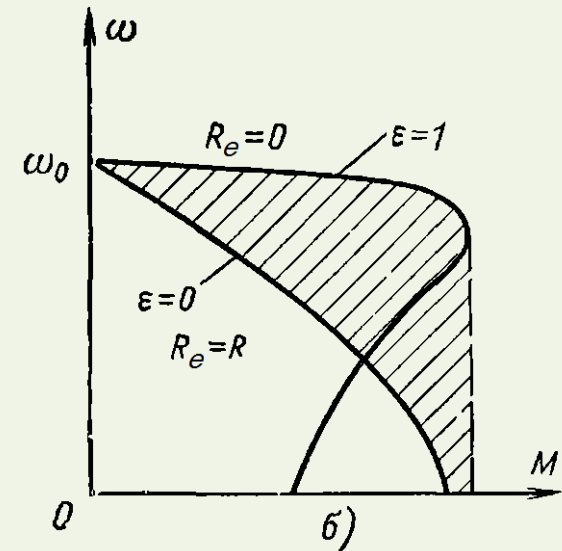
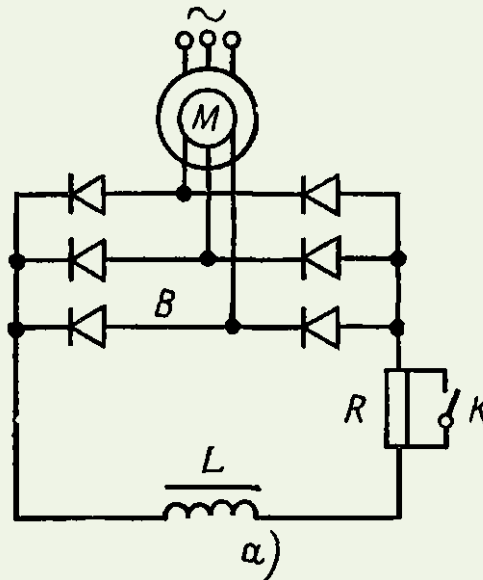


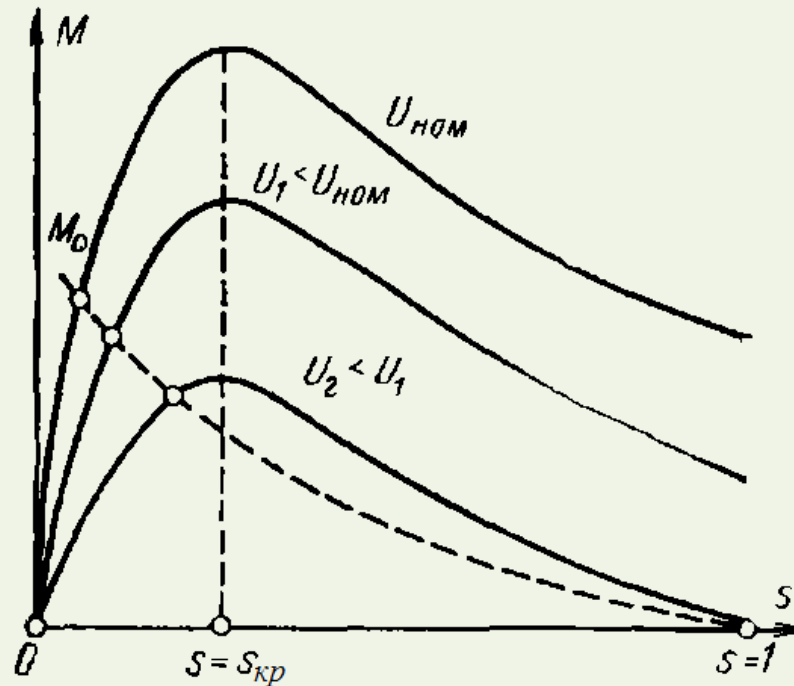
Схема вмикання асинхронного двигуна з фазним ротором з імпульсним параметричним регулюванням кутової швидкості (а), механічні характеристики (б)

6.8. Регулювання кутової швидкості асинхронного електропривода зміною напруги

Максимальний момент при зниженні напруги

$$M'_{кз} = M_{кз} \left(\frac{U'}{U_{ном}} \right)^2,$$

де $M_{кз}$ – максимальний момент при номінальній напрузі; $U', U_{ном}$ – знижена і номінальна напруга.



Механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при регулюванні напруги статора

6.9. Регулювання кутової швидкості асинхронного електропривода перемиканням числа полюсів

Кутова швидкість двигуна

$$\omega = \omega_0(1 - s) = \frac{2\pi f_1(1 - s)}{p}$$

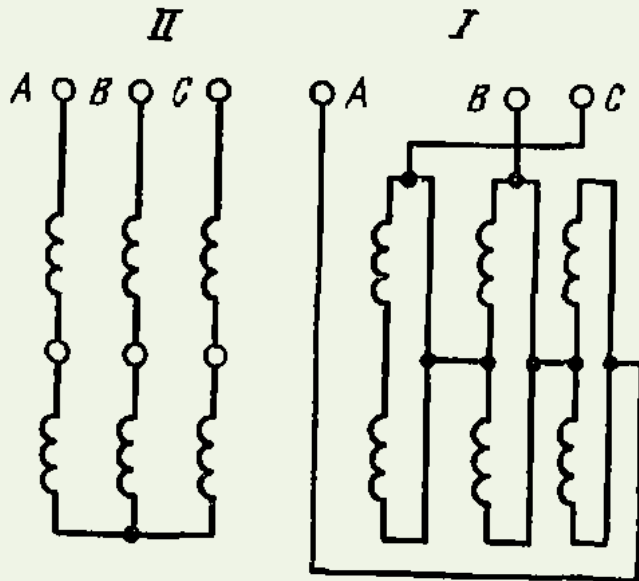
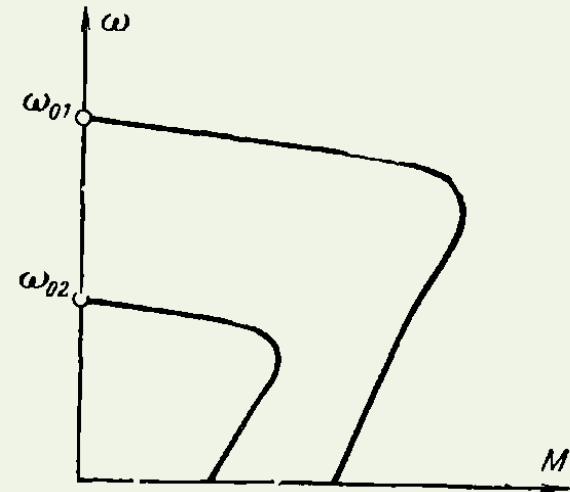


Схема перемикання обмоток статора



Механічні характеристики

Електромагнітний момент асинхронного двигуна

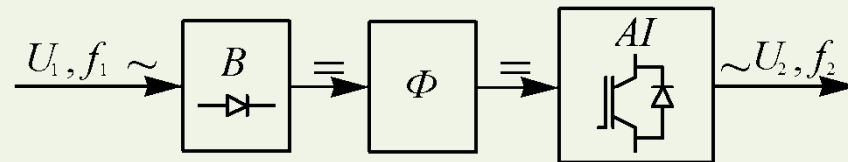
$$M = m_1 w k_{об} p \Phi I'_2 \cos \psi_2$$

Діапазон регулювання $D=6 : 1$.

6.10. Частотне регулювання асинхронних електроприводів

Перетворювачі частоти: з проміжною ланкою постійного струму, з безпосереднім зв'язком мережі живлення та кола навантаження (циклоконвертори), з проміжною ланкою змінного струму (циклоінвертори).

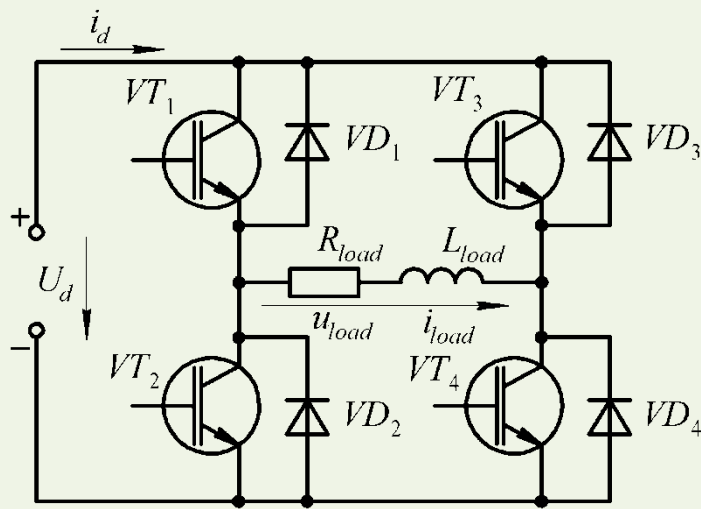
6.10.1. Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму



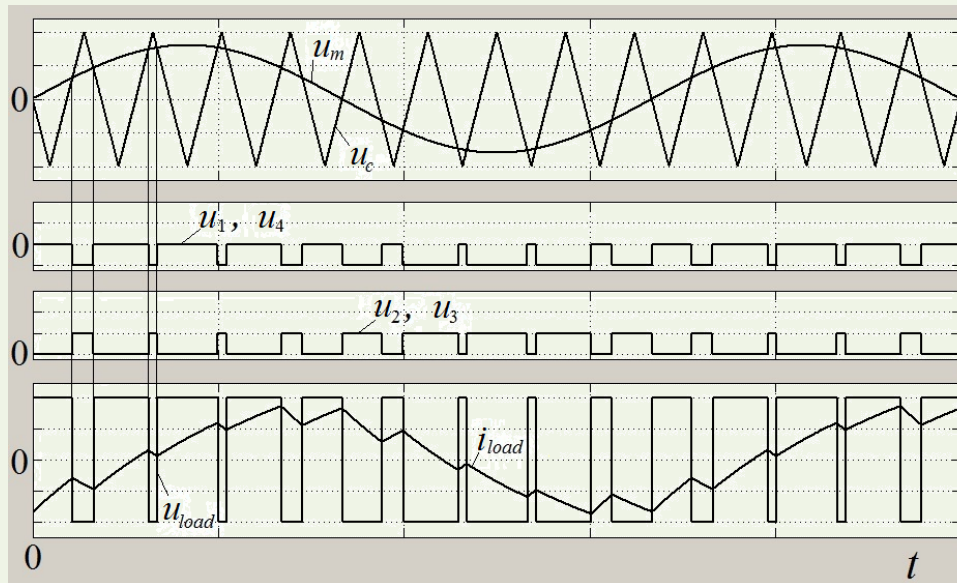
Структурна схема перетворювача з проміжною ланкою постійного струму

6.10.2. Автономні інвертори

В автономних інверторах напруги, в результаті перемикання СК, формується задана схемою керування напруга, а форма та фаза струму залежать від параметрів навантаження.



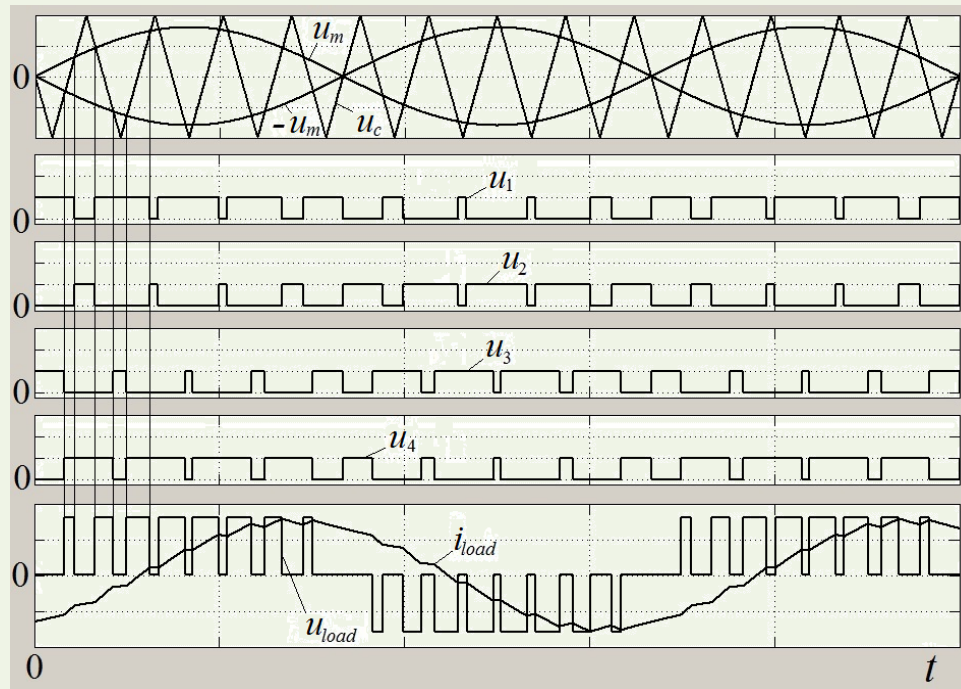
Однофазний мостовий інвертор напруги



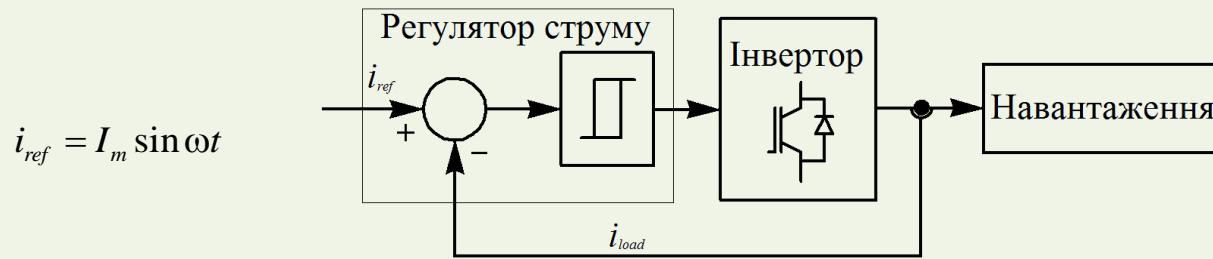
Двополярна синусоїдна ШІМ – осцилограми напруги модуляції u_m , несної напруги u_c , напруги керування транзисторами VT_1, VT_4 (u_1, u_4), транзисторами VT_2, VT_3 (u_2, u_3), струму i_{load} та напруги u_{load} в навантаженні

Регулювання вихідної напруги інвертора з ШІМ здійснюється за допомогою зміни коефіцієнту модуляції m , який визначається відношенням амплітуди модулюючого сигналу U_{mm} до амплітуди несучого сигналу U_{cm}

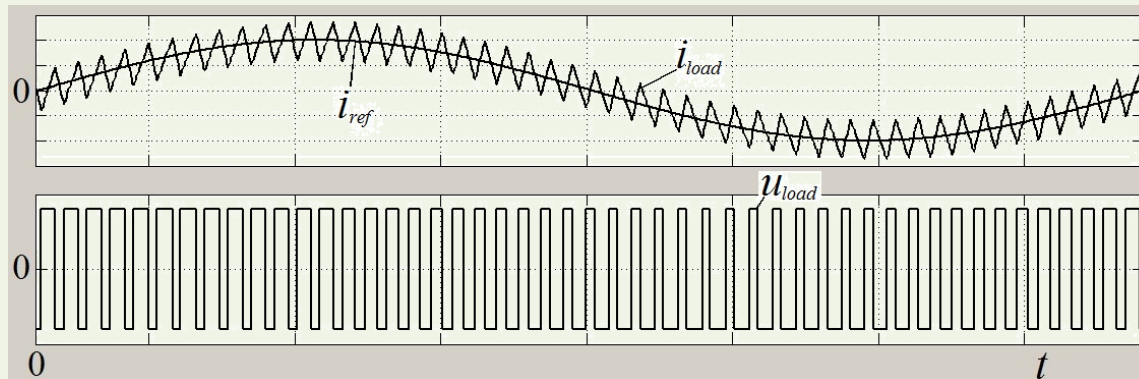
$$m = \frac{U_{mm}}{U_{cm}}.$$



Однополярна синусоїдна ШІМ – осцилограми напруги модуляції u_m , несної напруги u_c , напруги керування транзисторами VT_1 - VT_4 (u_1 - u_4), струму i_{load} та напруги u_{load} в навантаженні



a



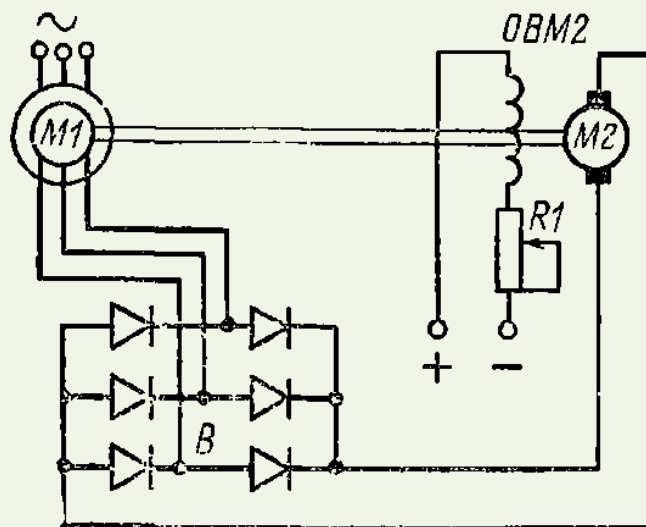
б

ШІМ з гістерезисним регулятором струму: *a* – блок-схема; *б* –
осцилограми заданого струму i_{ref} струму i_{load} та напруги u_{load}
навантаження

6.11. Асинхронний регульований електропривод у каскадних схемах

Каскадний електропривод: електричний і електромеханічний.

За типом перетворювального пристрою розрізняють електромашинні, вентильно-машинні та вентильні каскади.

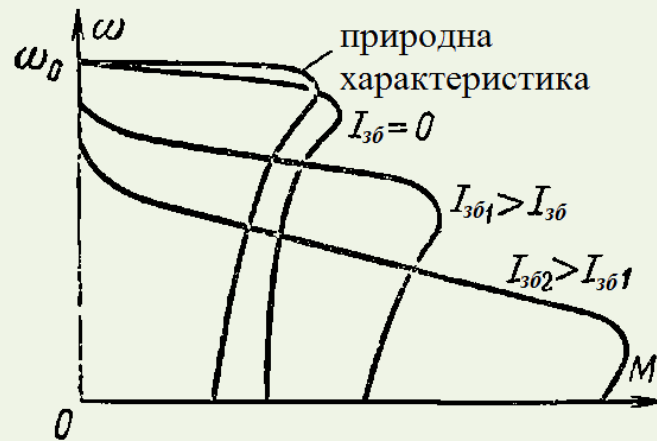


Принципова схема вентильно-машинного електромеханічного каскаду

Електромагнітний момент каскаду

$$M_{\text{каскад}} = M_{M1} + M_{M2} = \frac{(E_{d0} - mx_d I_d / 2\pi) I_d}{\omega_0} + k\Phi_{M2} I_d,$$

де E_{d0} – середнє значення ЕРС на виході випрямляча при ковзанні $s = 1$; m – кількість фаз випрямляча (для мостової схеми $m = 6$); x_d – приведений до кола ротора індуктивний опір фази асинхронного двигуна; I_d – струм у колі випрямленої напруги; ω_0 – синхронна кутова швидкість.



Механічні характеристики вентильно-машинного електромеханічного каскаду

Потужність асинхронного двигуна

$$P_{\text{мех}} = P_1(1 - s),$$

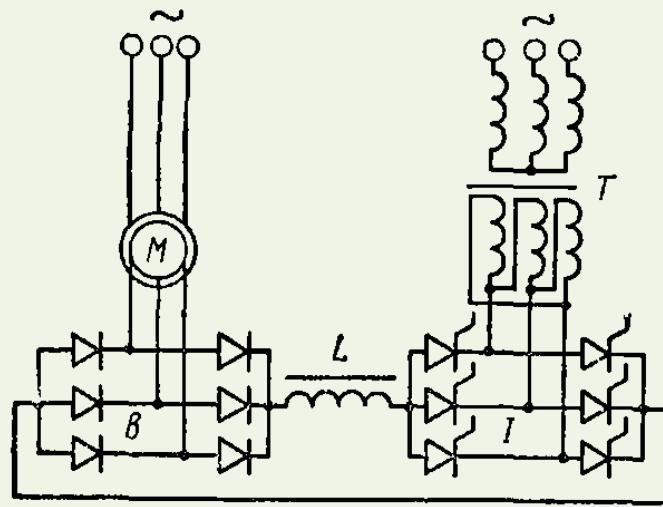
де P_1 – потужність споживання.

Потужність ковзання

$$P_s = P_1 s.$$

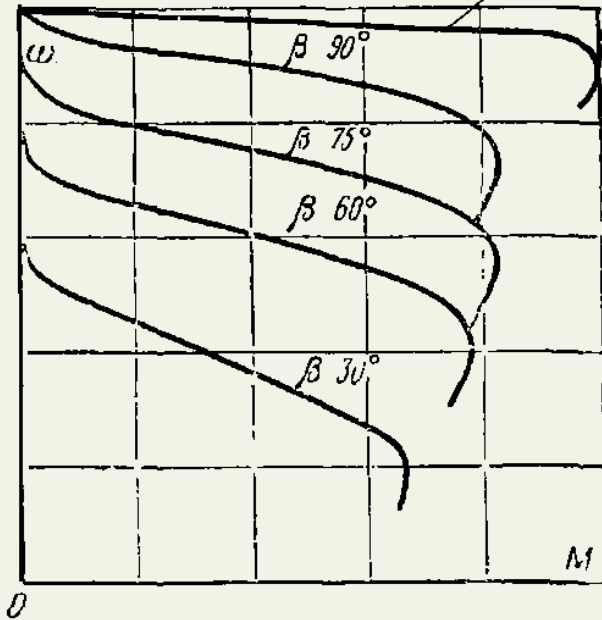
Діапазон регулювання

$$D = 2 : 1.$$



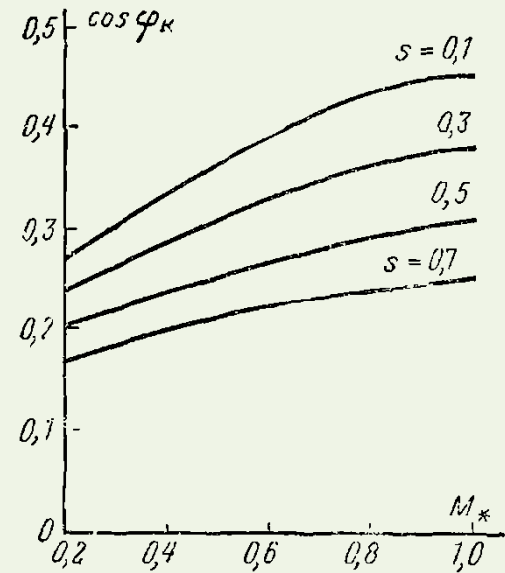
Принципова схема асинхронно-вентильного каскаду

Природна характеристика



Кут випередження β
пов'язаний з кутом α
співвідношенням

$$\beta = \pi - \alpha.$$



Механічні характеристики асинхронно-вентильного каскаду

Залежність коефіцієнту потужності від ковзання для асинхронно-вентильного каскаду