

**Практичні заняття**  
**з навчальної дисципліни «Основи електроприводу»**  
**6 семестр**

**Практичне заняття 1.**

Інструктаж з техніки безпеки. Ознайомлення з навчальною лабораторією. Правила надання першої домедичної допомоги при ураженні електричним струмом.

**Практичне заняття 2.**

Розрахунок кінематичних схем механічної частини електроприводів. Зведення моментів і сил опору. Зведення інерційних мас і моментів інерції до осі валу двигуна. Активний та реактивний моменти навантаження.

**1. Основні формули розрахунку одномасових кінематичних схем механічної частини електроприводів**

**Формули зведення моментів навантаження і моментів інерції до одного валу**

Приведення моментів до одної осі обертання валу двигуна можна здійснити на основі енергетичного балансу системи. При цьому втрати потужності в проміжних передачах враховуються введенням у розрахунки відповідно ККД ( $\eta_n$ ). Якщо кутову швидкість двигуна позначити через  $\omega_d$ , а кутову швидкість валу механізму  $\omega_m$ , тоді на основі рівності потужності одержимо:

$$M_{cm} \cdot \omega_m \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_d,$$
$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_n} = \frac{M_{c.m}}{i \cdot \eta_n}, \quad (1)$$

Звідки

де  $M_{cm}$  – момент статичного опору механізму;  $M_c$  – статичний момент

навантаження, приведений до швидкості валу двигуна;  $i = \frac{\omega_d}{\omega_m}$  – передавальне число редуктора.

Приведення сил виконується аналогічно приведенню моментів. Якщо швидкість поступального руху  $v$ , м/с, а кутова швидкість валу двигуна  $\omega_d$ , р/с, то

$$F_{cm} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_d.$$

Звідси

$$M_c = \frac{F_{c.m} \cdot v}{\omega_\partial \cdot \eta_n}, \quad (2)$$

де  $F_{cm}$  – сила опору виробничого механізму, Н.

Приведення моментів інерції до осі валу двигуна базується на тому, що сумарний запас кінетичної енергії рухомих мас, віднесених до однієї осі, залишається незмінним. При наявності обертових частин, що мають моменти інерції  $J_\partial, J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$  і кутові швидкості  $\omega_\partial, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ , можна замінити їх динамічну дію дією одного моменту інерції, приведенного до швидкості валу двигуна. В такому випадку можна записати

$$J_\Sigma \frac{\omega_\partial^2}{2} = J_\partial \frac{\omega_\partial^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + J_3 \frac{\omega_3^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2},$$

звідки

$$J_\Sigma = J_\partial + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_\partial^2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega_\partial^2} + J_3 \frac{\omega_3^2}{\omega_\partial^2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{\omega_\partial^2}. \quad (3)$$

Момент інерції суцільного циліндра обчислюється за формулою

$$J = m \frac{R^2}{2},$$

де  $m$  – маса циліндра;  $R$  – радіус циліндра. Формули для розрахунку моментів інерції інших елементів кінематичної схеми можна знайти у довідковій літературі.

Якщо механізм має обертальні і поступальні рухомі елементи, то сумарний зведений до валу двигуна момент інерції визначається на основі запасу кінетичної енергії всіх мас, що рухаються.

У загальному випадку сумарний момент інерції визначається за формулою:

$$J_\Sigma = J_\partial + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + J_3 \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2 \dots i_n^2} + m \left( \frac{v}{\omega_\partial} \right)^2 \quad (4)$$

Для приведення моменту інерції до поступального руху необхідно момент інерції замінити приведеною масою

$$m = J \left( \frac{\omega_\partial}{v} \right)^2.$$

Нижче наведена аналогія між основними величинами обертального і поступального руху.

Поступальний рух	Обертальний рух
Маса, міра інерції руху – $m$ , кг	Момент інерції, міра інерції руху – $J$ , кгм <sup>2</sup>
Сила, яка діє на тіло – $F$ , Н	Момент, який діє на валу – $M$ , Нм
Лінійна швидкість – $v$ , м/с	Кутова швидкість – $\omega$ , с <sup>-1</sup>
Потужність – $P = F \cdot v$ , Вт	Потужність – $P = M \cdot \omega$ , Вт
Лінійне прискорення – $a = \frac{dv}{dt}$ , м/с <sup>2</sup>	Кутове прискорення – $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ , с <sup>-2</sup>
Основне рівняння руху – $F - F_c = m \frac{dv}{dt}$	Основне рівняння руху – $M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$
Запас кінетичної енергії – $W_k = \frac{mv^2}{2}$ , Дж	Запас кінетичної енергії – $W_k = \frac{J\omega^2}{2}$ , Дж
Сумарна маса тіл, що знаходяться на одному підвісному канаті і рухаються з одною лінійною швидкістю – $m_\Sigma = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$	Сумарний момент інерції тіл, що знаходяться на одному валу і обертаються з одною кутовою швидкістю – $J_\Sigma = J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n$

### Основні співвідношення для розрахунку механіки електроприводів

Співвідношення між кутовою швидкістю і швидкістю обертання:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 = \frac{\pi \cdot n}{30}.$$

Потужність для обертального руху:  $P = M \cdot \omega$ .

Потужність для поступального руху:

$$P = F \cdot v.$$

Кінетична енергія для обертального руху:

$$A = J \cdot \omega^2 / 2.$$

Кінетична енергія для поступального руху:

$$A = m \cdot v^2 / 2.$$

Приведення моменту  $M_1$  на валу, що обертається зі швидкістю  $\omega_1$ , до валу, який обертається зі швидкістю  $\omega$  через передавальний пристрій з ККД  $= \eta_{II}$ :

$$M_{np} = M_1 \cdot \omega_1 / (\omega \cdot \eta_{II}).$$

Приведення зусилля  $F_1$ , яке діє на тіло, що рухається поступально зі швидкістю  $\omega$  через передавальний пристрій з ККД  $= \eta_{II}$ :

$$F_{np} = F_1 \cdot v_1 / (\omega \cdot \eta_{II}).$$

Приведення моменту інерції  $J_1$  тіла, що обертається зі швидкістю  $\omega_1$ , до валу, який обертається зі швидкістю  $\omega$  :

$$J_{np} = J_1 \cdot (\omega_1 / \omega)^2$$

Приведення маси  $m_1$ , що рухається з лінійною швидкістю  $v_1$ , до валу, який обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  :

$$J_{np} = m_1 \cdot (v_1 / \omega)^2$$

Рівняння руху тіл, що рухаються поступально:

$$\pm F \pm F_{np} = m_{np} \cdot (\pm dv / dt)$$

Рівняння руху електроприводу:

$$\pm M \pm M_{np} = J_{np} \cdot (\pm d\omega / dt)$$

Приблизне значення часу перехідного процесу в електроприводі:

$$t_{пп} = J_{np} \cdot \frac{\omega_{кін} - \omega_{поч}}{\pm M_{сер} \pm M_{с-сер}}$$

Момент на осі колеса транспортного механізму:

$$M_M = m_B \cdot g \cdot \beta \cdot (\mu \cdot D_{ц} + f)$$

де  $m_B$  - маса транспортного механізму з вантажем, що припадає на привідне колесо, кг;

$\beta$  - коефіцієнт, що враховує тертя реборди колеса до рейки ( $\beta = 1.3 - 1.5$ );

$D_{ц}$  - діаметр цапфи колеса, м;

$f$  - коефіцієнт тертя ковзання.

Таблиця 1

Коефіцієнти тертя деяких змашених матеріалів

Матеріали, що труться		$\mu_0$ при зрушення	$\mu$ під час руху
Вальниці ковзання:	бронза по бронзі	0.11	0.06
	залізо по залізі	0.11	0.08 ÷ 0.1
	сталь по бронзі	0.105	0.09
	чавун по бронзі	0.15 ÷ 0.2	0.07 ÷ 0.08
Вальниці кочення:	ходових коліс	---	0.008
	роликів рольгангів		0.01 ÷ 0.015
	кранових редукторів		0.005

Типи механічних передач	ККД
Циліндричні зубчасті	0.80 ÷ 0.99
Конічні зубчасті	0.97 ÷ 0.98
Черв'ячні	0.61 ÷ 0.82
Пасові	0.94 ÷ 0.98
Клино-пасові	0.81 ÷ 0.98
Ланцюгові	0.97 ÷ 0.98
Фрикційні	0.71 ÷ 0.78
Цапфи опор	0.94 ÷ 0.98
Блоки	0.96 ÷ 0.97
Поліспасти	0.92 ÷ 0.98

## 2. Основні формули розрахунку багатомасових кінематичних схем механічної частини електроприводів

При синтезі ЕП після спрощень найчастіше використовуються три розрахункові схеми:

- 1) Тримасова – для детального аналізу та якісного синтезу електромеханічних систем із двома суттєвими пружними зв'язками. Використовується найрідше, рис.1.6.

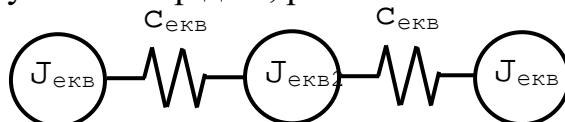


Рис.1.6.

- 2) Двомасова – найбільш адекватно відображує процеси більшості електромеханічних систем з одним суттєвим пружним зв'язком, рис.1.7.

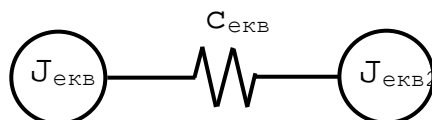


Рис.1.7.

- 3) Одномасова – застосовується найчастіше для синтезу та аналізу електропривода та електромеханічних систем із високою жорсткістю зв'язків або коли жорсткістю зв'язків нехтують. Усі маси замінюються однією еквівалентною, рис.1.8.



Рис.1.8.

Рухомі елементи кінематичної схеми можуть мати паралельні ділянки, що характерно для багатодвигунних електроприводів. Еквівалентна жорсткість обчислюється за формулою (1.14), рис.1.9.

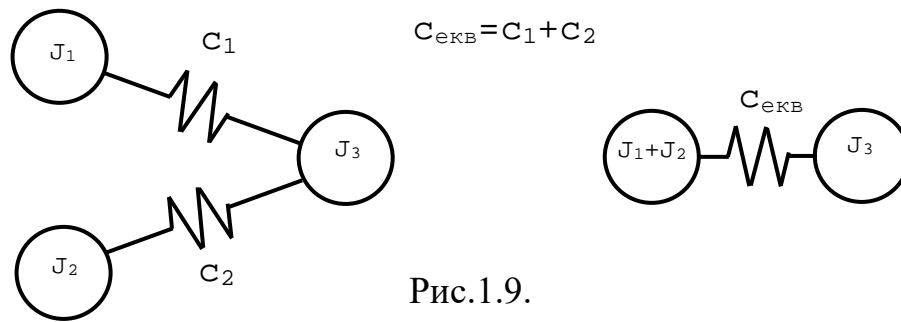


Рис.1.9.

В реальних системах завжди є дисипативні сили, наприклад, сили внутрішнього в'язкого тертя, які призводять до поглинання енергії механічних коливань, обумовлених пружністю механічних зв'язків. На розрахункових схемах сили внутрішнього в'язкого тертя з коефіцієнтом тертя  $\beta$  позначається механічним демпфером, який встановлюється паралельно пружному зв'язку, рис.1.10.

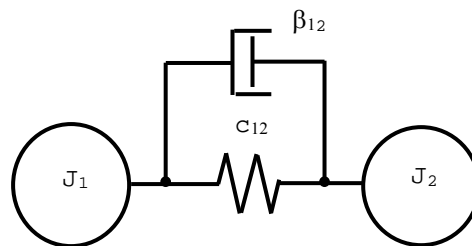


Рис.1.10.

Сили внутрішнього тертя пропорційні швидкості деформації. Для обертального руху момент тертя дорівнює

$$M_{\text{вт}} = \beta \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \beta \Delta\omega, \quad (1.15)$$

а для поступального руху сила тертя

$$F_{\text{вт}} = \beta \Delta V. \quad (1.16)$$

Приведення коефіцієнта в'язкого тертя (демпфірування) виконується на основі збереження енергії дисипації  $W_{\text{д}} = W_{\text{д}}'$ . Для обертального руху

$$W_{\text{д}} = \frac{\beta \Delta\omega^2}{2}, \quad \text{тому}$$

$$\beta_i' = \frac{\beta_i}{i_{li}^2}. \quad (1.17)$$

Аналогічно для поступального руху

$$\beta_i' = \beta_i \cdot \rho_{li}^2. \quad (1.18)$$

При послідовному з'єднанні елементів еквівалентний коефіцієнт тертя знаходиться аналогічно до (1.13)

$$\frac{1}{\beta_{\text{екв}}} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{\beta_3} + \dots, \quad (1.19)$$

а при паралельному – до (1.14)

$$\beta_{\text{екв}} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots \quad (1.20)$$

З вищенаведеного розрахункова схема створюється за наступним

алгоритмом:

- 1) Складається кінематична схема реальної системи;
- 2) Обчислюються реальні значення параметрів елементів кінематичної схеми: маси, моменти інерції, жорсткості тощо;
- 3) Визначається швидкість, до якої буде здійснюватися приведення параметрів (найчастіше - це швидкість двигуна);
- 4) Усі параметри приводяться до вибраної швидкості та складається попередня розрахункова схема;
- 5) По кількісних значеннях приведених параметрів визначаються суттєві жорсткості (найменші) та маси (найбільші);
- 6) На основі аналізу результату п'ятого пункту попередня розрахункова схема спрощується до необхідного ступеню, тобто до типової три-, дво-, чи одномасової схеми.

Механічні частини електромеханічних систем у багатьох випадках не є жорсткими (штивними) і у багатьох випадках їх податливість необхідно враховувати при складанні розрахункових схем кінематичних ланок. У таких випадках отримуються багатомасові системи: двомасові, тримасові тощо.

При розрахунку руху таких систем вводять поняття **коефіцієнта жорсткості**  $C$  пружного елемента. Він являє собою коефіцієнт пропорційності між лінійною  $\Delta L$  чи кутовою  $\Delta\varphi$  деформацією і виникаючим при цьому у пружному елементі силою  $F_{np}$  чи моментом  $M_{np}$ :  $F_{np} = C_1 \Delta L$  чи  $M_{np} = C_2 \cdot \Delta\varphi$ .

Коефіцієнти жорсткості  $C_1$  і  $C_2$  визначаються геометричними розмірами пружного елемента та матеріалу з якого вони виготовлені.

Так, наприклад, для пружного стержня при його розтягуванні чи стисканні коефіцієнт жорсткості в Н/м розраховується як  $C_1 = SE/L$ , де  $L$  – довжина стержня, м,  $S$  – площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль пружності, Па.

Для вала діаметром  $R$  при його скручуванні коефіцієнт жорсткості в Н/м розраховується як  $C_2 = J_s G / L$ , де  $J = \pi R^4 / 2$  – момент інерції поперечного січення вала, м<sup>4</sup>,  $G$  – модуль пружності кручення, Па;  $L$  – довжина вала, м.

Чим більший коефіцієнт жорсткості пружного елемента, тим менша деформація виникає в ньому. Величина, що є оберненою до коефіцієнта жорсткості, називається **податливістю**.

При складанні розрахункових схем механічної частини ЕМС, виконують зведення до валу двигуна коефіцієнта жорсткості пружного елемента за такими формулами:

- для пружного вала пр. крученні -  $c = c_1 / i^2$  ;
- для пружного елемента, що рухається поступально, при розтягуванні чи стисканні:  $c = c_1 \rho^2$ ,

де  $i, \rho$  - передавальне число редуктора та приведений радіус кінематичної схеми між валом двигуна та пружним елементом.

При паралельному сполученні пружних елементів з коефіцієнтами жорсткості  $c_1, c_2, c_3, c_4 \dots$  - еквівалентна жорсткість розраховується за формулою:

$$c_{екв} = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + \dots, \text{ а при послідовному: } \frac{1}{c_{екв}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} + \frac{1}{c_4} + \dots$$

Двомасова розрахункова схема механічної частини ЕМС отримується, якщо в складі ЕМС один пружний елемент. Двомасова заступна (розрахункова) схема може бути отримана і за наявності декількох пружних елементів в кінематичній схемі при її еквівалентуванні на основі наведених вище формул. Така схема показана на наступному рисунку 1.

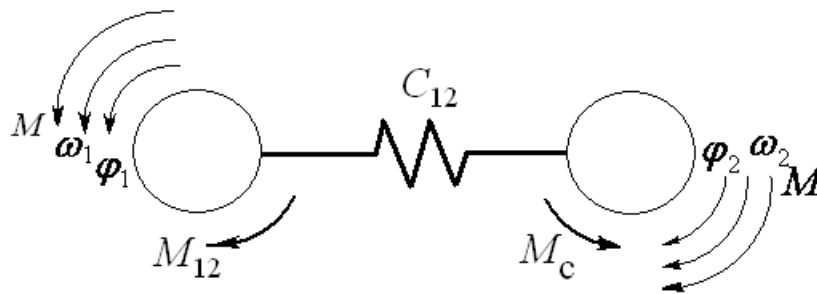


Рис.1. Розрахункова схема двомасової системи

Звичайно першу масу I утворює маса ротора та елементи між двигуном та пружним елементом, а другу масу II – виконавчий орган та елементи між ним і пружним елементом. Обидві інерційні маси з'єднані пружним елементом з коефіцієнтом жорсткості  $C$ , і у загальному випадку їх швидкості  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , а також кути повороту  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  відповідно не є однаковими.

## 2. Розв'язування задачі на розрахунок кінематичної схеми механізму піднімальної лебідки

**Задача 1.** Для показаної на рисунку розрахункової схеми механізму піднімальної лебідки виконати розрахунки зі зведення моменту навантаження у випадку піднімання вантажу для таких параметрів кінематичної схеми:  $J_{\partial} = 0,1 \text{ кгм}^2$ ;  $J_1 = 0,02 \text{ кгм}^2$ ;  $J_2 = 2 \text{ кгм}^2$ ;  $m = 1000 \text{ кг}$ ;  $R_{\partial} = 0,15 \text{ м}$ ;  $v_{ум} = 0,9 \text{ м/с}$ ;  $z_1 = 14$ ;  $z_2 = 86$ ; ккд редуктора  $\eta_p = 0,97$ ; ккд лебідки  $\eta_p = 0,96$ .

Розрахунок передавального числа редуктора:

$$i = z_1 / z_2 = 86 / 14 = 6,14$$

Розрахунок радіуса зведення кінематичної схеми:

$$\rho = R_{\partial} / i = 0,15 / 6,14 = 0,025$$

Розрахунок зведеного до осі вала двигуна моменту інерції всіх елементів кінематичної схеми:

$$J = J_{\partial} + J_1 + J_2 / i^2 = 0,1 + 0,02 + 2 / 6,14^2 + 1000 \times 0,025^2 = 0,8 \text{ кгм}^2.$$

Розрахунок зведеного до осі вала момента статичного навантаження:



$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot \rho}{\eta_p \cdot \eta_b} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,025}{0,27 \cdot 0,96} = 263 \text{ Нм}$$

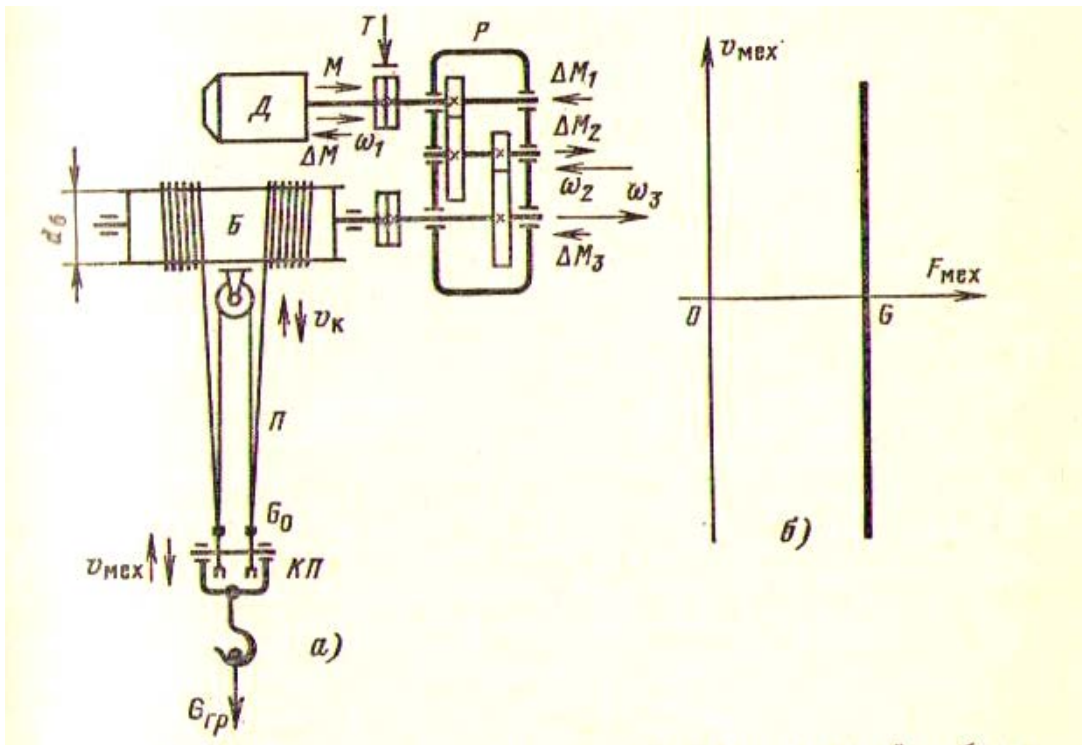


Рис.1. Кінематична а) та розрахункова б) схема піднімальної лебідки

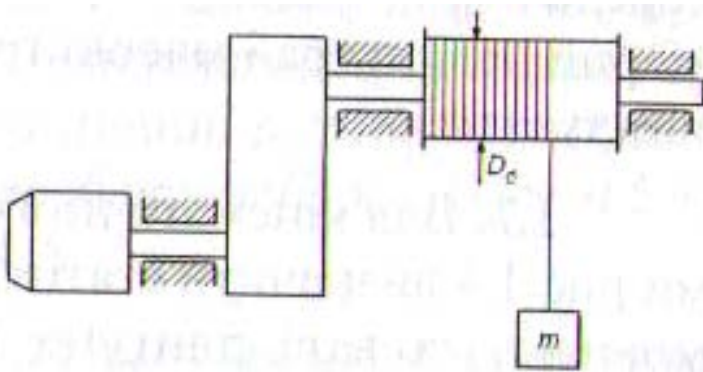


Рис.2. Розрахункова схема механічної частини електроприводу

**Задача 2.** Розрахувати зведений до осі валу двигуна статичний момент, момент інерції механізму підіймача та сумарний момент інерції, що зведений до осі валу двигуна, (рис.2) при підніманні вантажу масою 1500кг зі швидкістю  $V=1.75 \text{ м/с}$ . Двигун обертається зі швидкістю  $\omega_{дв} = 97 \text{ с}^{-1}$ . Діаметр барабана

$D_b = 75 \text{ см}$ , момент інерції барабана  $J_b = 7,5 \text{ кгм}^2$ . Коефіцієнт корисної дії (ккд) передач  $\eta = 0.91$ . Коефіцієнт корисної дії (ккд) передач  $\eta = 0.91$ . Момент інерції двигуна  $J_{дв} = 0,8 \text{ кгм}^2$ . Момент інерції редуктора, зведений до осі валу двигуна,  $J_p = 0,25 \text{ кгм}^2$ . Масою линви можна знехтувати або задати самостійно.

Розв'язок

Статичний момент, зведений до осі валу двигуна, при підніманні вантажу:

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot V}{\omega_{дв} \cdot \eta} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 1,75}{97 \cdot 0,91} = 8,91 \text{ Нм.}$$

Кутова швидкість барабана:

$$\omega_{\delta} = \frac{2 \cdot V}{D_{\delta}} = \frac{2 \cdot 1,75}{0,75} = 4,66 \text{ рад/с.}$$

Передавальне число передач:

$$i = \frac{\omega_{\delta\delta}}{\omega_{\delta}} = \frac{97}{4,66} = 20,82$$

Момент інерції механізму, зведений до осі вала двигуна:

$$J_{\text{мех}} = J_P + \frac{J_{\delta}}{i_p^2} + \frac{m \cdot V^2}{\omega_{\delta\delta}^2} = 2,5 + \frac{7,5}{20,82^2} + \frac{1500 \cdot 1,75^2}{97^2} = 0,765 \text{ кгм}^2.$$

Сумарний момент інерції електроприводу, зведений до осі вала двигуна:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{мех}} + J_{\delta\delta} = 0,765 + 0,8 = 1,565 \text{ кгм}^2.$$

**Задача 3.** Розрахувати величину статичного моменту  $M_c$  на валі двигуна і зведений до валу двигуна момент інерції  $J_{зв}$  механізму лебідки з вантажем (рис.3). Маса вантажу  $m_v = 950$  кг. Швидкість піднімання вантажу  $V = 1,25$  м/с. Швидкість обертання приводного двигуна  $n = 1420$  об/хв. Діаметр барабана  $D_{\delta} = 55$  см. Момент інерції барабана  $J_{\delta} = 4,3$  кгм<sup>2</sup>. Коефіцієнт корисної дії передавального механізму  $\eta = 0,89$ . Моментом інерції редуктора та масою линви можна знехтувати, або задатися їх значенням самостійно.

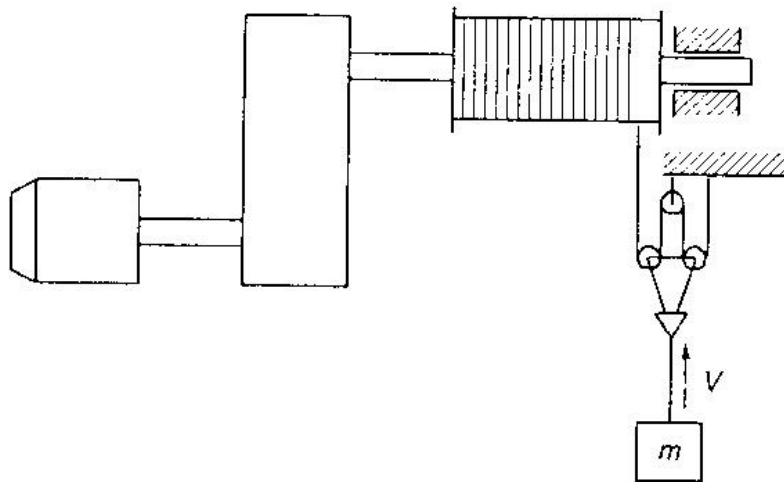


Рис.3. Розрахункова схема механічної частини електроприводу

### Практичне заняття 3.

Моделювання режимів плавного запускання та зміни навантаження для двигуна постійного струму незалежного збудження

**Мета роботи:** набути практичних навиків моделювання режимів плавного запускання та зміни навантаження для ДПС НЗ засобами пакету MATLAB / Simulink.

#### Програма роботи

- 1.Скласти у середовищі MATLAB / Simulink блочну діаграму ДПС НЗ для моделювання режимів плавного запускання та зміни навантаження.
- 2.Згідно варіанту завдання ввести у відповідні діалогові вікна вказані значення параметрів моделі та чисельного методу.
- 3.Налаштувати блочну діаграму та виконати її розрахунок.
- 4.Отримати такі графічні залежності та конвертувати їх у текстовий редактор Word у форматі "Метафайл Windows (EMF)".
  - 4.1.Залежність частоти обертання від часу  $\omega(t)$ .
  - 4.2.Залежність електромагнітного моменту від часу  $M(t)$  та моменту навантаження від часу  $M_s(t)$ .
  - 4.3.Залежність частоти обертання від електромагнітного моменту  $\omega(M)$
- 5.Конвертувати у текстовий редактор Word блочну діаграму моделі.

#### Параметри моделі

Конструктивна стала:  $C = 1.0027$  [В с].

Опір якорного кола:  $R_a = 0.25$  [Ом].

Індуктивність якорного кола:  $L_a = 5$  [мГн].

Темп наростання напруги: 220 [В/с].

Час наростання: 1 [с].

Кінцевий час розрахунку: 2 [с].

Момент навантаження  $M_s(t)$  [Н м] вибирається згідно табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Підгрупа	1	2
Момент зміни [с]	1.5	1.5
Початкове значення [Н*м]	20	20
Кінцеве значення [Н*м]	40	10

Сумарний момент інерції .  $J$ [кг м<sup>2</sup>] вибирається згідно табл. 3.2.

Таблиця 3.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$J$ [кг*м <sup>2</sup> ]	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60

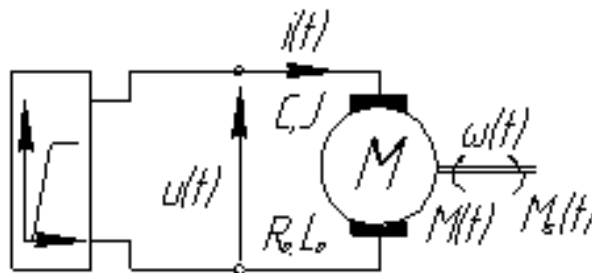
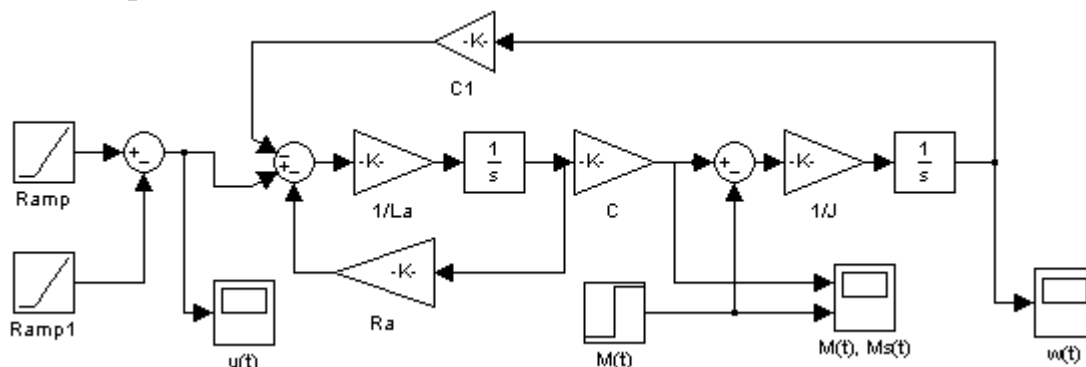


Рис. 3.1.Функціональна схема Математична модель

$$\left. \begin{aligned} \frac{di(t)}{dt} &= \frac{1}{L_a} (u(t) - C \cdot \omega(t) - R_a \cdot i(t)), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{1}{J} (C \cdot i(t) - M_s(t)), \\ M(t) &= C \cdot i(t) \end{aligned} \right\}$$

**Звіт про виконану роботу повинен містити такі обов'язкові елементи**

1. Тема, мета, та програма роботи.
2. Параметри моделі та чисельного методу згідно заданого варіанту.
3. Графічні залежності, вказані у програмі роботи.
4. Блочна діаграма моделі.



*Рис. 3.2. Блочна діаграма*

5. Висновок. Дати кількісний (відношення величини пускового моменту до номінального значення 40 [Н м]) та якісний (вказати причини) аналіз поведінки електромагнітного моменту під час плавного пуску та зміни навантаження.

## Практичне заняття 4.

### Електромеханічні властивості і характеристики електроприводів (ЕП) з двигунами постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням (НЗ).

Мета заняття:

1. Вивчити схеми включення двигунів постійного струму з незалежним збудженням.
2. Опанувати аналітичну залежність для розрахунку природної та штучних механічної і швидкісної характеристик ДПС НЗ у русійному та гальмівних режимах.
3. Засвоїти моделі для розрахунку і побудови штучних механічних і швидкісних характеристик ДПС НЗ у русійному та гальмівних режимах.

#### Розрахунок механічних двигуна постійного струму незалежного збудження

Для двигуна постійного струму з незалежним збудженням  $P_n=11$  кВт,  $I_n=59$  А,  $U_n=220$  В;  $\omega_n=314$  1/с виначити :

1. електричний кд характеристики;
2. внутрішній опір якоря;
3. побудувати природну електромеханічну характеристику;
4. побудувати штучну електромеханічну характеристику з уведенням послідовно в коло якоря додатковим опором  $R_d=1.63$  Ом;
5. побудувати штучну електромеханічну характеристик; при діаємичному гальмуванні, в якій при номінальній швидкості струм у колі якоря дорівнює 118А.

$$P_n := 11 \quad U_n := 220 \quad I_n := 59 \quad \omega_n := 314 \quad R_d := 1.63$$

Розрахунок кд  $\eta := \frac{P_n \cdot 10^3}{U_n \cdot I_n} \quad \eta = 0.847$

Розрахунок внутрішнього опору кола якоря:  $R_a := \frac{0.5 \cdot (U_n \cdot I_n - P_n \cdot 10^3)}{I_n^2} \quad R_a = 0.284$

Розрахунок конструктивного коефіцієнта двигуна:  $c := \frac{U_n - R_a \cdot I_n}{\omega_n} \quad c = 0.647$

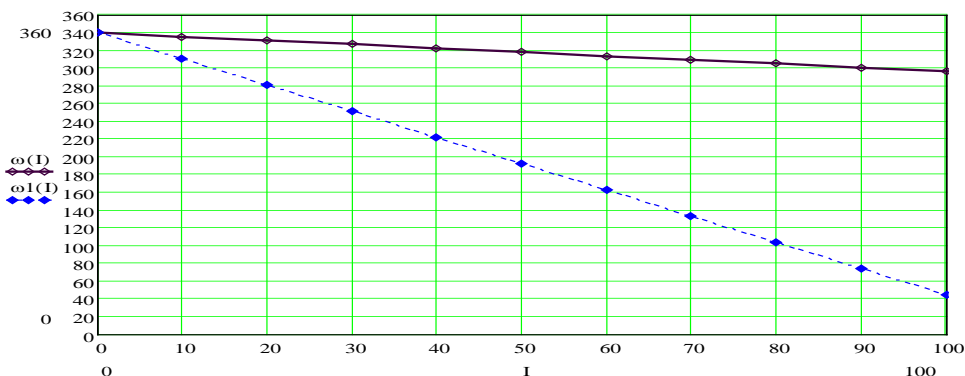
Кутова швидкість неробочого ходу двигуна;  $\omega_0 := \frac{U_n}{c} \quad \omega_0 = 339.927$

Розрахунок струму короткого замикання двигуна:  $I_{kz} := \frac{U_n}{R_a} \quad I_{kz} = 773.556$

Координати двох точок природної електромеханічної характеристики двигуна:  $I=0 \quad \omega=\omega_0$   
 $I=I_{kz} \quad \omega=0$

Побудова природної і штучної електромеханічної характеристики двигуна:

$$\omega(I) := \frac{U_n - I \cdot R_a}{c} \quad \omega_1(I) := \frac{U_n - I \cdot (R_a + R_d)}{c} \quad I := 0, 10.. 150$$

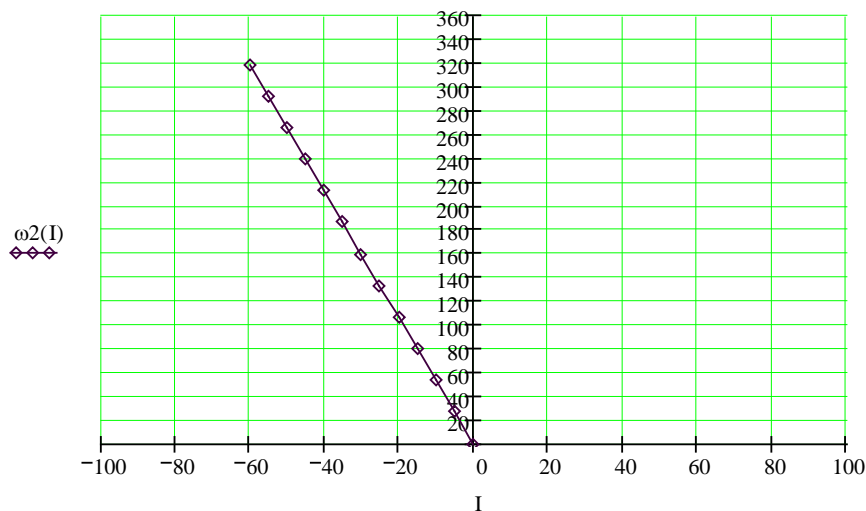


Розрахунок опору динамічного гальмування:

$$R_{dg} := \frac{c \cdot \omega_n}{I_n} - R_a$$

$R_{dg} = 3.16$

$$\omega_2(I) := \frac{0 - I \cdot (R_a + R_{dg})}{c} \quad I := -60, -55.. 0$$

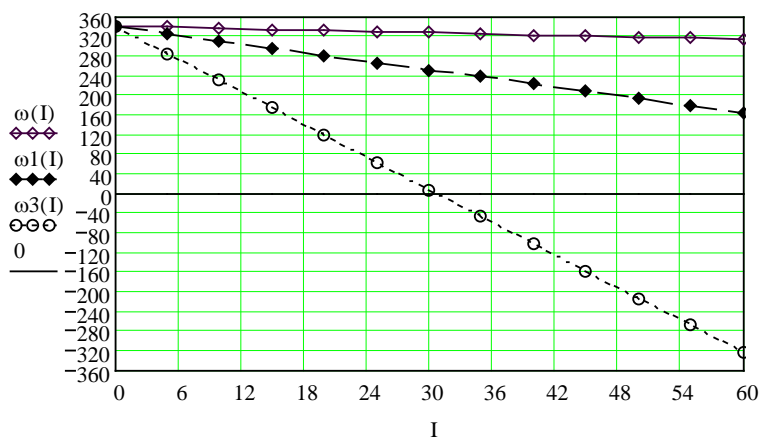


Розрахунок опору для режиму противикання:

$$R_{pr} := \frac{U_n + c \cdot \omega_n}{I_n} - R_a$$

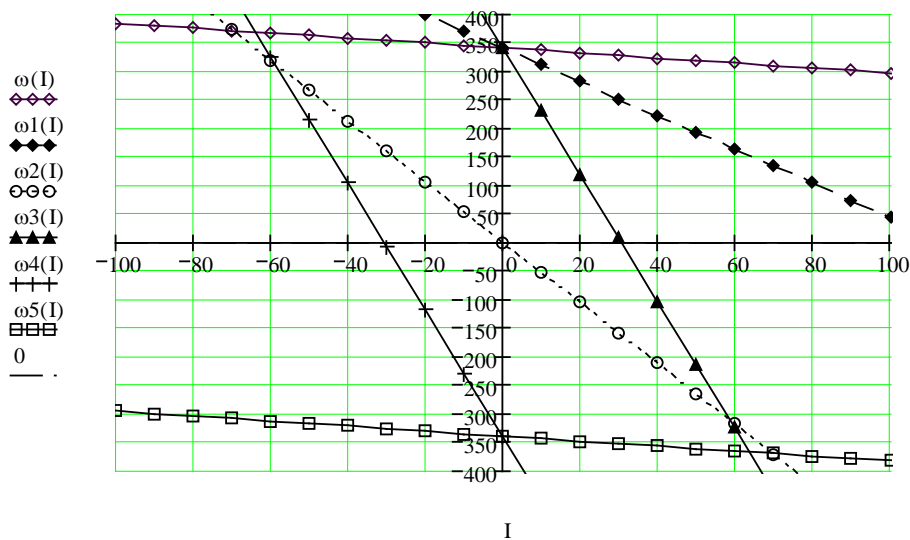
$R_{pr} = 6.889$

$$\omega_3(I) := \frac{U_n - I \cdot (R_a + R_{pr})}{c} \quad I := 0, 5.. 60$$



$$\omega_4(I) := \frac{-U_n - I \cdot (R_a + R_{pr})}{c} \quad I := -100, -90.. 100$$

$$\omega_5(I) := \frac{-U_n - I \cdot (R_a)}{c}$$



Розрахунок і побудова **механічних характеристик** двигуна постійного струму незалежного збудження у **рушійних** (режим двигуна) і **гальмівних режимах**

$$\omega(M) := \frac{U_n}{c} - \frac{M \cdot Ra}{c^2}$$

$$\omega_1(M) := \frac{U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra + Rd)}{c^2}$$

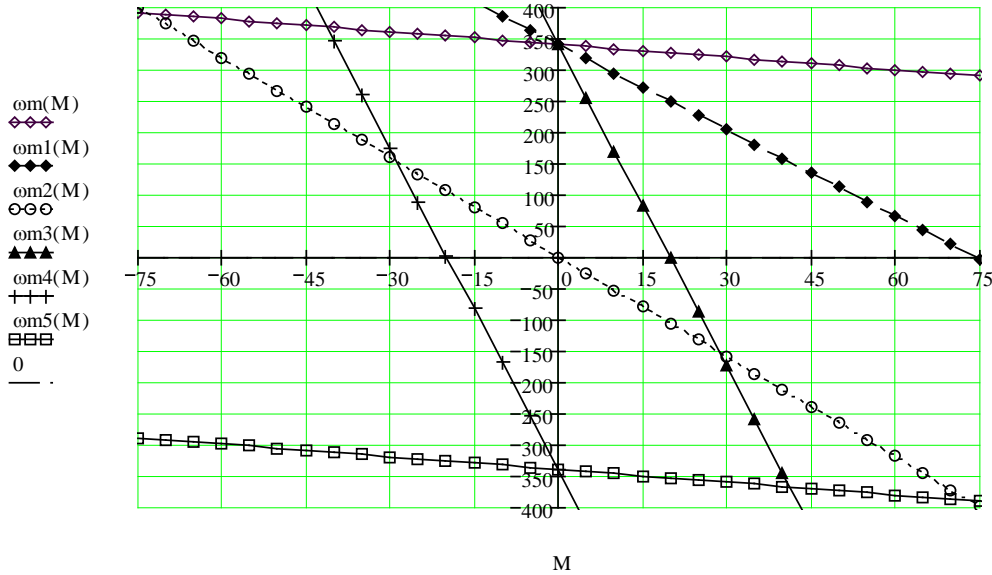
$$\omega_2(M) := \frac{0}{c} - \frac{M \cdot (Ra + Rdg)}{c}$$

$$\omega_3(M) := \frac{U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra + Rpr)}{c^2}$$

$$\omega_4(M) := \frac{-U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra + Rpr)}{c^2}$$

$$\omega_5(M) := \frac{-U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra)}{c^2}$$

M := -75, -70.. 75



Розрахунок і побудова **механічних характеристик** при **регулюванні (ослабленні) магнітного потоку** двигуна постійного струму незалежного збудження

$$c = 0.647$$

$$c_1 := c \cdot 0.8$$

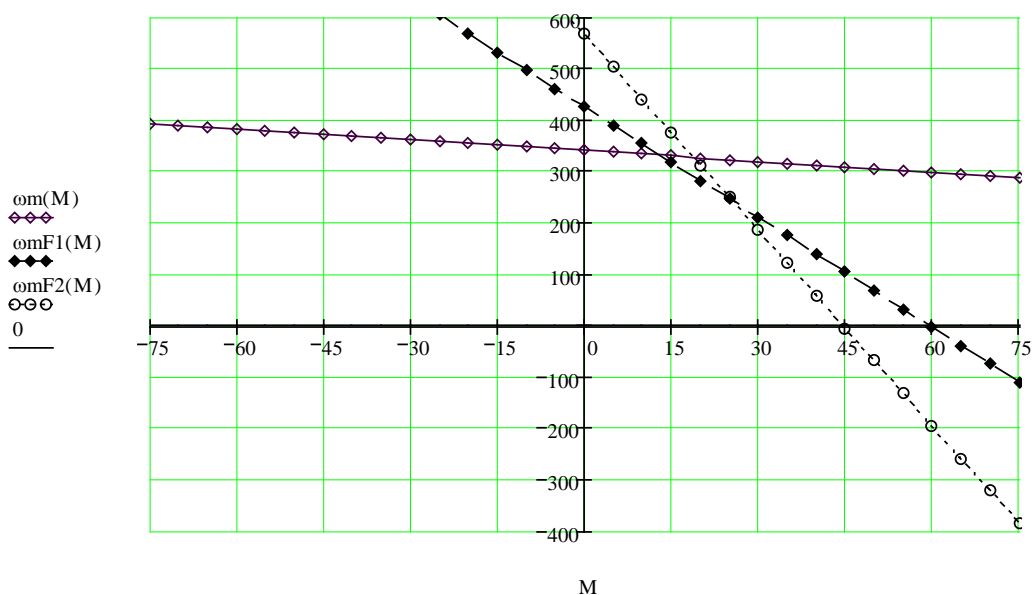
$$c_2 := c \cdot 0.6$$

M := -75, -70.. 75

$$\omega(M) := \frac{U_n}{c} - \frac{M \cdot Ra}{c^2}$$

$$\omega_{F1}(M) := \frac{U_n}{c_1} - \frac{M \cdot (Ra + Rd)}{c_1^2}$$

$$\omega_{F2}(M) := \frac{U_n}{c_2} - \frac{M \cdot (Ra + Rd)}{c_2^2}$$



$$M_n := c \cdot I_n$$

$$M_n = 38.185$$

Розрахунок і побудова **електромеханічних (швидкісних) характеристик** при **регулюванні (ослабленні) магнітного потку** двигуна постійного струму незалежного збудження

$$c = 0.647$$

$$c_1 := c \cdot 0.8$$

$$c_2 := c \cdot 0.6$$

$$I := -25, -20.. 125$$

$$\omega(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra)}{c}$$

$$\omega F_1(I) := \frac{U_n}{c_1} - \frac{I \cdot (Ra)}{c_1}$$

$$\omega F_2(I) := \frac{U_n}{c_2} - \frac{I \cdot (Ra)}{c_2}$$

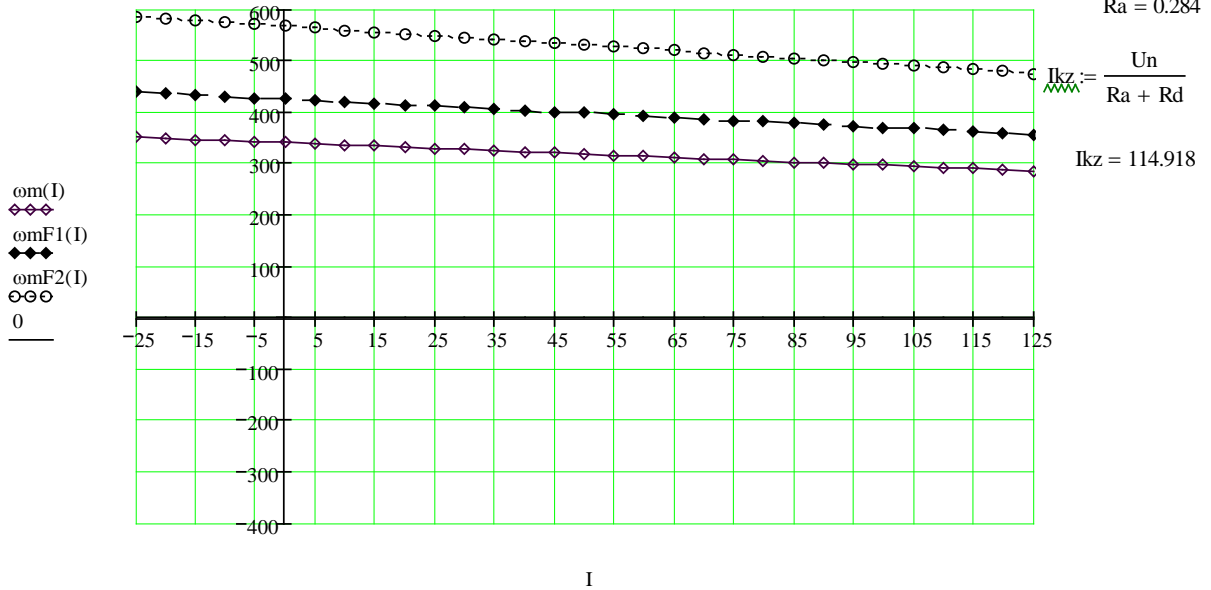
$$I_n = 59$$

$$R_d = 1.63$$

$$R_a = 0.284$$

$$I_{kz} := \frac{U_n}{R_a + R_d}$$

$$I_{kz} = 114.918$$



Розрахунок і побудова **реостатних електромеханічних (швидкісних) характеристик** двигуна постійного струму незалежного збудження при **регулюванні (ослабленні) магнітного потку**

$$c = 0.647$$

$$c_1 := c \cdot 0.8$$

$$c_2 := c \cdot 0.6$$

$$I := -30, -20.. 130$$

$$\omega_{pr}(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra)}{c}$$

$$\omega(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra + Rd)}{c}$$

$$\omega F_1(I) := \frac{U_n}{c_1} - \frac{I \cdot (Ra + Rd)}{c_1}$$

$$\omega F_2(I) := \frac{U_n}{c_2} - \frac{I \cdot (Ra + Rd)}{c_2}$$

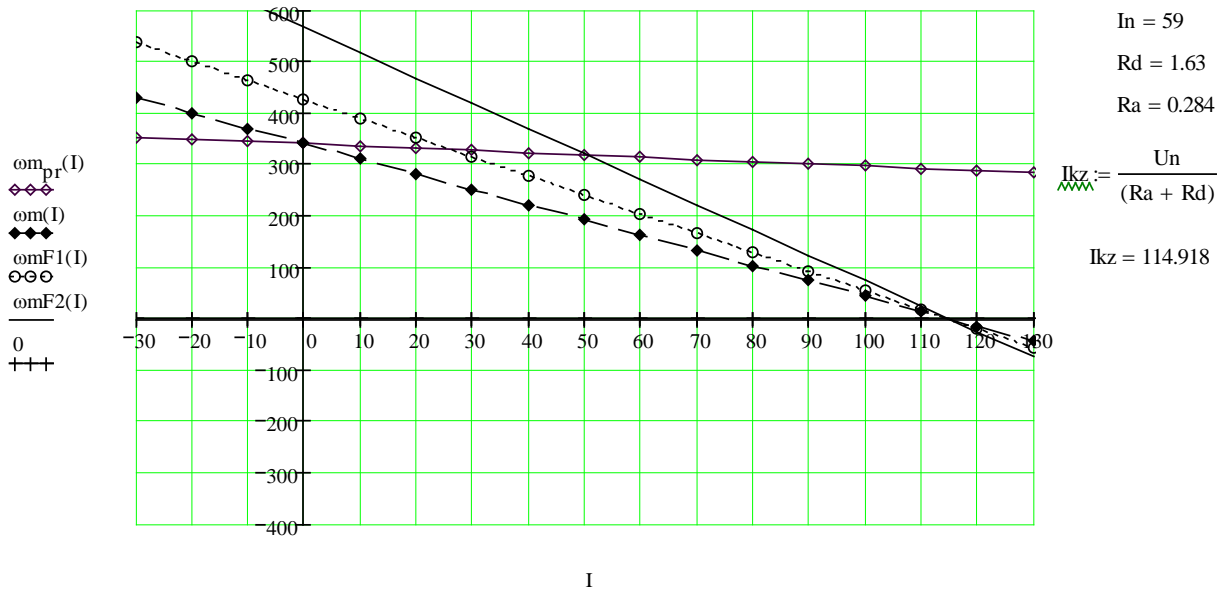
$$I_n = 59$$

$$R_d = 1.63$$

$$R_a = 0.284$$

$$I_{kz} := \frac{U_n}{R_a + R_d}$$

$$I_{kz} = 114.918$$





$$c = 0.647$$

$$c_1 := c \cdot 0.8$$

$$c_2 := c \cdot 0.65$$

$$c_3 := c \cdot 0.5$$

$$M := -75, -70..75$$

$$\omega(M) := \frac{U_n}{c} - \frac{M \cdot Ra}{c^2}$$

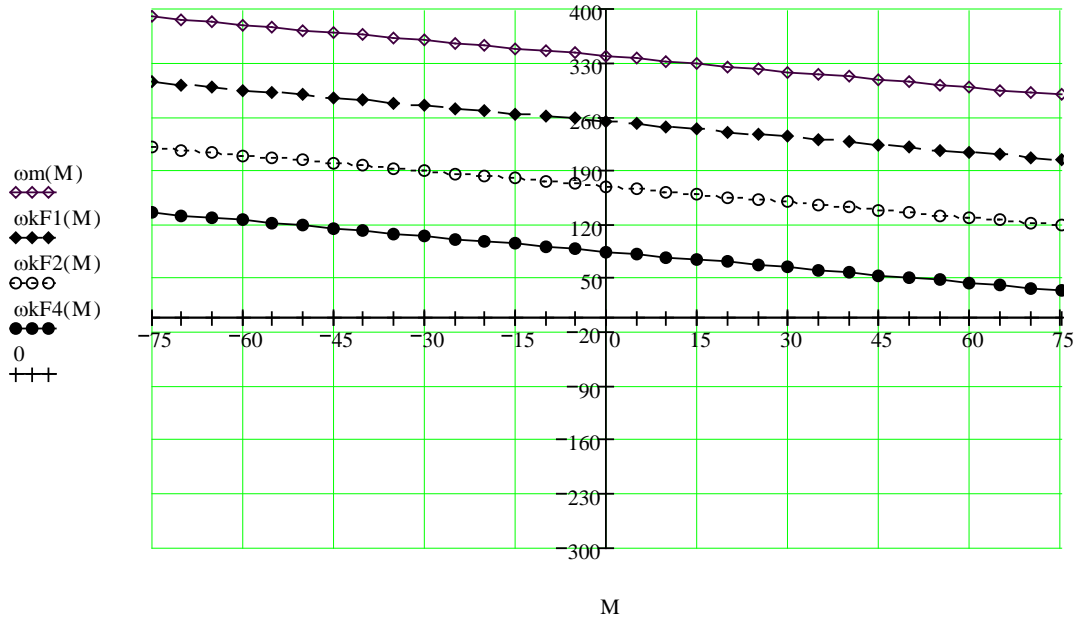
$$\omega_{kF1}(M) := \frac{0.75 \cdot U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra + 0)}{c^2}$$

$$\omega_{kF2}(M) := \frac{0.5 \cdot U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra + 0)}{c^2}$$

$$\omega_{kF4}(M) := \frac{0.25 \cdot U_n}{c} - \frac{M \cdot (Ra + 0)}{c^2}$$

$$M_n := c \cdot I_n$$

$$M_n = 38.185$$



Розрахунок і побудова **електромеханічних (швидкісних) характеристик при регулюванні (ослабленні) магнітного потку двигуна постійного струму незалежного збудження**

$$c = 0.647$$

$$c_1 := c \cdot 0.8$$

$$c_2 := c \cdot 0.65$$

$$c_3 := c \cdot 0.5$$

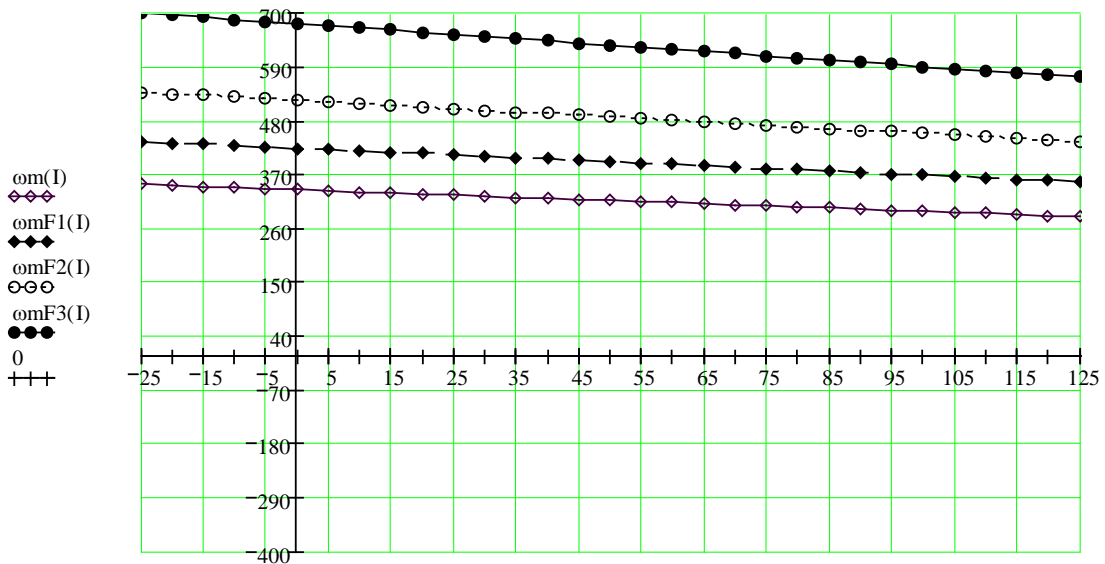
$$I := -25, -20..125$$

$$\omega(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra)}{c}$$

$$\omega_{kF1}(I) := \frac{U_n}{c_1} - \frac{I \cdot (Ra)}{c_1}$$

$$\omega_{kF2}(I) := \frac{U_n}{c_2} - \frac{I \cdot (Ra)}{c_2}$$

$$\omega_{kF3}(I) := \frac{U_n}{c_3} - \frac{I \cdot (Ra)}{c_3}$$



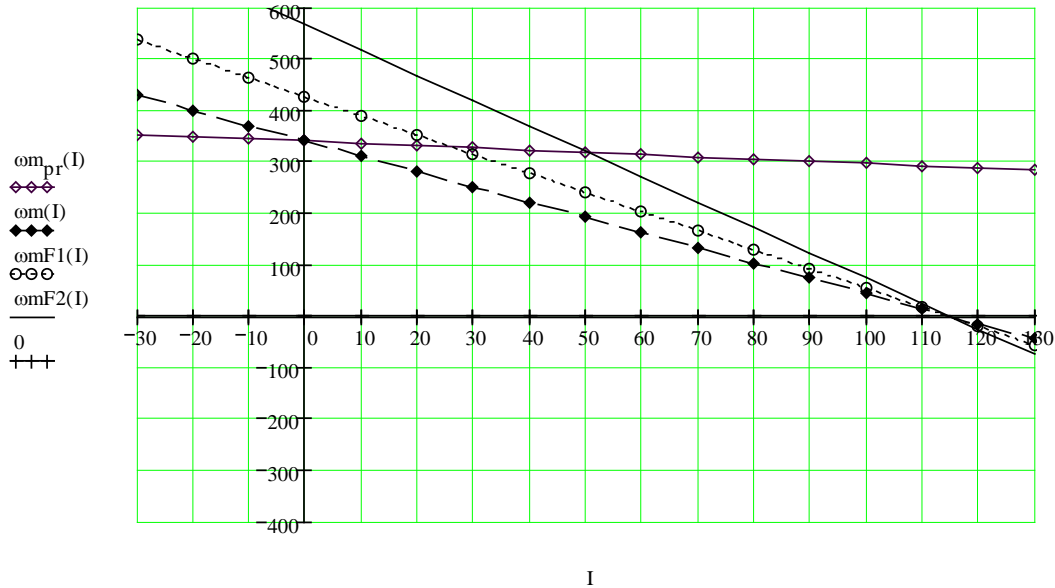
I

Розрахунок і побудова **реостатних електромеханічних (швидкісних) характеристик** двигуна постійного струму незалежного збудження при **регулюванні (ослабленні) магнітного потку**

$$c = 0.647 \quad c_1 := c \cdot 0.8 \quad c_2 := c \cdot 0.6 \quad I := -30, -20.. 130$$

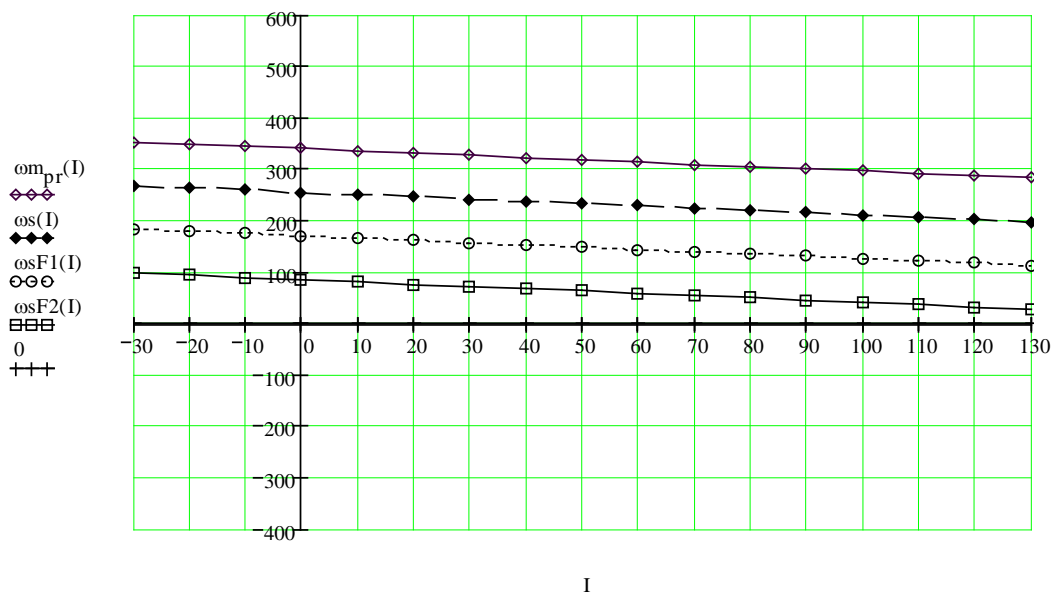
$$\omega_{pr}(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra)}{c} \quad \omega(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra + Rd)}{c} \quad \omega_{F1}(I) := \frac{U_n}{c_1} - \frac{I \cdot (Ra + Rd)}{c_1}$$

$$\omega_{F2}(I) := \frac{U_n}{c_2} - \frac{I \cdot (Ra + Rd)}{c_2}$$



$$\omega_{pr}(I) := \frac{U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra)}{c} \quad \omega_s(I) := \frac{0.75 \cdot U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra + 0)}{c} \quad \omega_{F1}(I) := \frac{0.5 \cdot U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra + 0)}{c}$$

$$\omega_{F2}(I) := \frac{0.25 \cdot U_n}{c} - \frac{I \cdot (Ra + 0)}{c} \quad I := -30, -20.. 130$$



**Технічні дані двигунів постійного струму типу Д, 220В закритих з природним охолодженням, режим ТВ=40%; захищених з незалежною вентиляцією, режим ТВ=100%**

№	Тип	Паралельного збудження														
		без стабілізуючої обмотки													Відмінності двигуна зі стабілізуючою обмоткою	
		режим ТВ=100%			режим ТВ=40%			$R_{я} + R_{дп}, \text{ Ом}$	$R_{пар}, \text{ Ом}$	к-сть актив- них провідни- ків якоря $L$	к-сть паралельних віток якоря $2a$	к-сть витків полюса паралельної обмотки $W_{пар}$	магнітний потік полюса $\Phi, \text{ мВб}$	струм збуд- ження паралельної обмотки $I_{н}, \text{ А}$	ТВ=100%	ТВ=40%
		$P_{н}, \text{ кВт}$	$n_{н}, \text{ об/хв}$	$I_{н}, \text{ А}$	$P_{н}, \text{ кВт}$	$n_{н}, \text{ об/хв}$	$I_{н}, \text{ А}$								$n_{н}, \text{ об/хв}$	$n_{н}, \text{ об/хв}$
1	Д-12	2,5	1118	14,6	2,4	1230	14	1,63	260	990	2	1800	4,6	0,65	1140	1200
2	Д-21	4,5	1030	26	3,6	1080	20,5	0,95	128	920	2	1650	5,8	1,24	1000	1060
3	Д-22	6,0	1100	33	4,8	1150	26	0,57	130	696	2	1480	7,4	1,18	1070	1120
4	Д-31	8,0	840	44	6,8	880	37	0,42	107	738	2	1700	8,8	1,42	820	850
5	Д-32	12,0	770	65	9,5	800	51	0,28	94	558	2	1470	13,2	1,6	740	770
6	Д-41	16,0	690	86	13,0	720	69,5	0,17	70	492	2	1480	17	2,2	670	700
7	Д-806	22,0	650	116	16	710	84	0,1085	65	372	2	1400	25	2,7	635	700
8	Д-808	37,0	575	192	22	630	112	0,054	44,4	278	2	1250	38	3,93	565	620
9	Д-810	55,0	550	282	29	600	148	0,036	46,2	234	2	1500	47,5	3,85	540	590
10	Д-812	75,0	515	380	38	565	192	0,023	34,4	210	2	1550	57,2	5,1	505	555
11	Д-814	110,0	500	550	55	560	280	0,081	35,2	60S	8	1200	82,1	6,25	490	550
12	Д-816	150,0	480	745	70	535	350	0,084	24,7	504	8	1160	104	7,44	470	525
13	Д-818	185	450	920	83	470	415	0,0066	17,3	504	8	1000	111	10,20	440	460

	ТИП	Паралельного збудження														
		без стабілізуючої обмотки													відмінності двигуна зі стабілізуючою обмоткою	
		режим ТВ=100%			режим ТВ=40%			$\gamma_{я} + \gamma_{дп}, Ом$	$\gamma_{пар}, Ом$	к-сть актив- них провід- ників якоря	N к-сть паралельних віток якоря	2a к-сть витків полюса паралельної обмотки W <sub>пар</sub>	магнітний потік полюса Ф, МВб	струм збуд- ження паралельної обмотки	ТВ=100%	ТВ=40%
		$P_n, кВт$	$n_n, об/хв$	$I_n, А$	$P_n, кВт$	$n_n, об/хв$	$I_n, А$								$n_n, об/хв$	$n_n, об/хв$
14	Д-21	5,5	1440	31	4,4	1500	24,5	0,531	128	690	2	1650	5,8	1,24	1400	1460
15	Д-22	8,0	1510	43,5	6,5	1570	34,0	0,322	130	522	2	1480	7,4	1,18	1450	1510
16	Д-31	12,0	1360	64	9,5	1420	50,5	0,194	107	492	2	1700	8,8	1,42	1310	1360
17	Д-32	18,0	1190	94	13,0	1240	68,0	0,125	94	372	2	1470	13,2	1,6	1140	1190
18	Д-41	24,0	1100	124	17,5	1160	90,5	0,072	70	310	2	1480	17,0	2,2	1060	1120
19	Д-806	32,0	1000	165	21,0	1060	110,0	0,047	65	246	2	1400	25,0	2,7	980	1050
20	Д-808	47,0	800	238	26,0	825	134,0	0,0295	44,4	210	2	1250	37,2	3,93	770	810

## Практичне заняття 5. Розрахунок і побудова природної і штучних механічних характеристик асинхронних двигунів.

Мета заняття:

1. Вивчити основні схеми включення асинхронних двигунів в режимі двигуна, генераторному режимі та в гамівних режимах.
2. Вивчити рівняння (уточнену і спрощену формули Клосса) для побудови природної і штучних механічних характеристик асинхронних двигунів.
3. Вивчити рівняння для побудови механічних характеристик асинхронних двигунів в режимі противмикання та режимі динамічного гальмування.
4. Розв'язування задачі на розрахунок і побудову природної і штучних механічних характеристики асинхронних двигунів.

Задача 1. Для асинхронного двигуна МТВ512-8 за каталожними даними визначити параметри і розрахувати та побудувати його природну механічну характеристику, а також штучні механічні характеристики при  $R'_{2д} = 0.5 \cdot R'_{2н}$  і при  $U_1 = 0.7 \cdot U_{1н}$ .

Паспортні дані двигуна МТВ512-8 є такі:  $P_n = 40$  кВт;  $n_0 = 750$  об/хв;  $U_{1л} = 380$  В;  $U_{2к} = 322$  В;  $I_{1н} = 76.5$  А;  $I_{2н} = 76.5$  А;  $\cos\phi_n = 0.69$ ;  $\lambda = 2.8$ ;  $n_n = 730$  об/хв;  $R_1 = 0.08$  Ом;  $X_1 = 0.17$  Ом;  $R_2 = 0.072$  Ом;  $X_2 = 0.24$ ,  $k_e = 1.12$ .

Розрахунок номінальної фазної напруги статора асинхронного двигуна і кутової швидкості неробочого ходу і номінальної кутової швидкості:

$$U_{1\phi_n} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В ,}$$

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 750}{30} = 78.54 \text{ рад/с ,}$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3.14 \cdot 730}{30} = 76.45 \text{ рад/с ,}$$

де  $n_n$  — номінальна швидкість обертання, об/хв.

Номінальний обертальний момент асинхронного двигуна розраховується за формулою:

$$M_n = \frac{P_{2н}}{\omega_n} = \frac{40 \cdot 10^3}{76.45} = 523.25 \text{ Нм .}$$

де  $P_n$  - номінальна потужність асинхронного двигуна;

$n_n$  — номінальна швидкість обертання, об/хв.

Для розрахунку природної механічної характеристики знайдемо індуктивний опір короткого замикання асинхронного двигуна:

$$x_k = x_1 + x'_2 = 0.17 \cdot 0.24 = 0.41 \text{ Ом .}$$

Розрахункове значення критичного моменту на природній характеристиці в режимі двигуна обчислимо за таким виразом:

$$M_{кр} = \frac{3 \cdot p_n \cdot U_{1\phi_n}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_2^2 + x_k^2})} ,$$

$$M_{кр.нр} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 220^2}{2 \cdot 314.2 \cdot (0.08 + \sqrt{0.072^2 + 0.41^2})} = 1857.16 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де  $s_{кр}$  – критичне ковзання асинхронного двигуна.

Критичне повзання асинхронного двигуна на природній характеристиці визначається при  $R_{2\Sigma} = R_2$  за формулою:

$$s_{кр} = \pm \frac{R_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = \pm \frac{0.072}{\sqrt{0.08^2 + 0.41^2}} = \pm 0.172.$$

Точки природної механічної характеристики асинхронного двигуна (рис.2, крива 1) обчислимо згідно уточненої формули Клосса:

$$M_{нр} = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot (1 + a \cdot s_{кр})}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} + 2 \cdot a \cdot s_{кр}},$$

$$a = \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} = \frac{0.08}{0.072} = 1.11.$$

Для розрахунку і побудови реостатної характеристики визначимо номінальний опір ротора  $R_{2н}$ , при якому  $I_2 = I_{2н}$ , якщо  $s=1$ :

$$R_{2н} = \frac{U_{2к}}{I_{2н} \cdot \sqrt{3}} = \frac{322}{76.5 \cdot \sqrt{3}} = 2.43 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт зведення опорів:

$$k_R = \frac{m_1}{m_2} k_e^2 = \frac{3}{3} \cdot 1.12^2 = 1.254.$$

Зведений додатковий опір ротора:

$$R_{2д} = 0.5 \cdot R_{2н} \cdot k_R = 0.5 \cdot 2.43 \cdot 1.254 = 1.448 \text{ Ом}.$$

Сумарний опір роторного кола:

$$R_{2\Sigma} = R_2 + R_{2д} = 0.072 + 1.448 = 1.52 \text{ Ом}.$$

Критичне ковзання для штучної реостатної характеристики:

$$s_{кр.шт.} = \pm \frac{R_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = \pm \frac{1.52}{\sqrt{0.08^2 + 0.41^2}} = \pm 3.639.$$

Штучна реостатна механічна характеристика (рис.2, крива 1) розраховується згідно уточненої формули Клосса:

$$M_{шт1} = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot (1 + a_1 \cdot s_{кр.шт.})}{\frac{s_{кр.шт.}}{s} + \frac{s}{s_{кр.шт.}} + 2 \cdot a_1 \cdot s_{кр.шт.}},$$

$$a_1 = \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} = \frac{0.08}{1.52} = 0.053.$$

Штучна механічна характеристика при зниженій напрузі  $U_1 = 0.7 \cdot U_{1н}$  буде масштабувати природну характеристику вздовж осі моментів у  $\left(\frac{U_1}{U_{1н}}\right)^2 = 0.49$  разів (рис.2, крива 3). Рівняння для цієї механічної характеристики є таким:

$$M_{um1} = 0.49 \cdot \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot (1 + a \cdot s_{кр})}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} + 2 \cdot a \cdot s_{кр}}$$

На рис.2 показано графіки розрахованих природної 1 і штучних: реостатної 2 і штучної характеристики 3 при зниженій напрузі живлення статора.

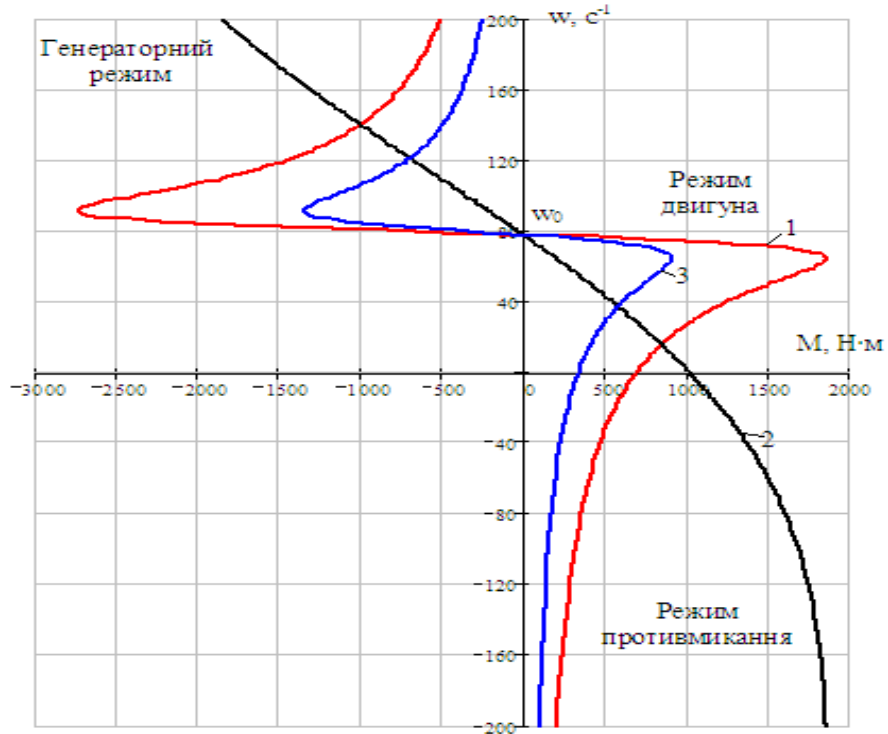
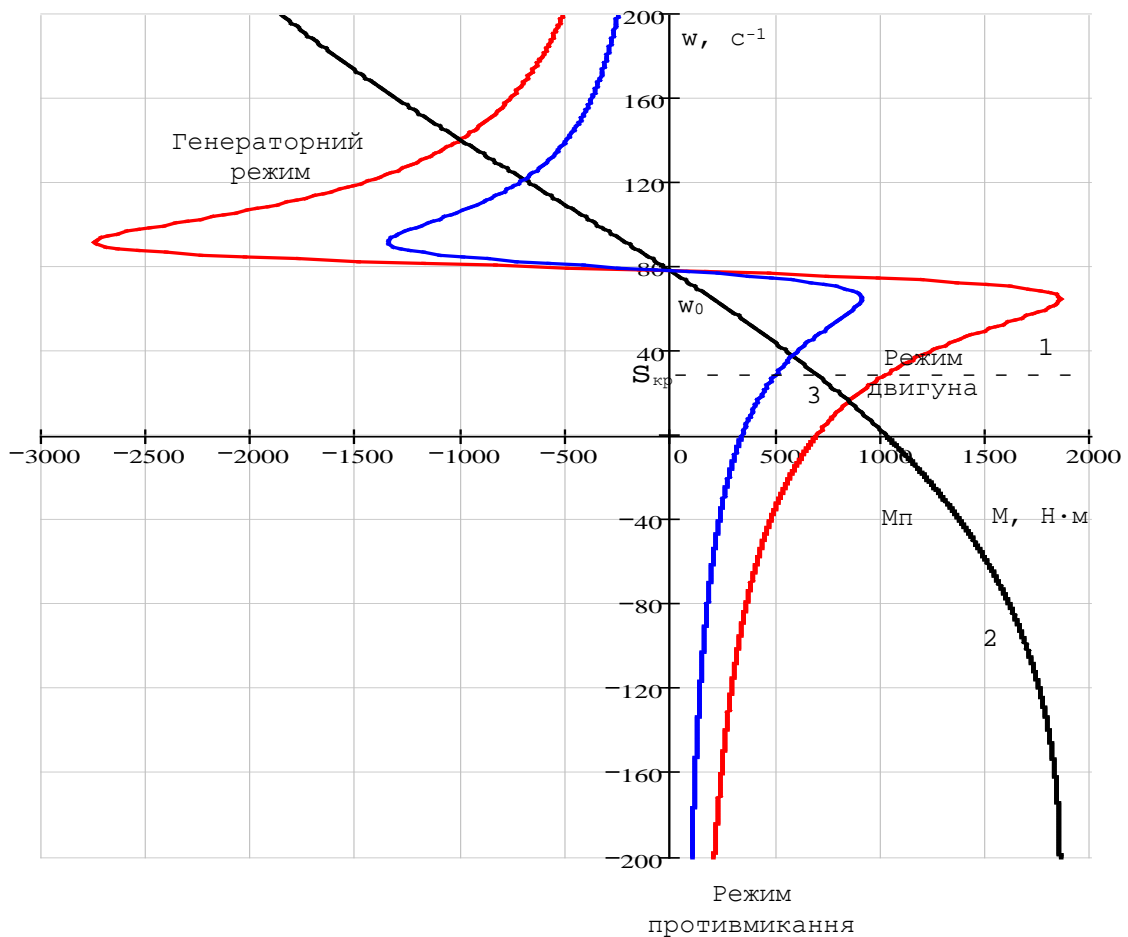


Рис. 1. Механічні характеристики асинхронного двигуна.



Розрахунок механічних характеристик асинхронного двигуна 4АК200М4

*Паспорт ні дані асинхронного двигуна 4АК200М4 :*

$P_H := 71 \times 10^3 \text{ Вт}$	$r_1 := 0.015 \text{ Ом}$	$U_f := 220 \text{ В}$
$I_H := 170 \text{ А}$	$x_1 := 0.053 \text{ Ом}$	$n := 1400 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$
$\text{ККД} := 91.5\%$	$r_2 := 0.021 \text{ Ом}$	
$\cos\phi_H := 0.86$	$x_2 := 0.064 \text{ Ом}$	
$E_{p0} := 250 \text{ В}$	$J_0 := 0.2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	
$\lambda := 3$	$p_0 := 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$	
$S_H := 0.025$		
$s_k := 0.195$		

*Розрахункові величини :*

$$\omega_0 := \frac{2 \cdot \pi \cdot p_0}{60} \quad \omega_0 = 157.08$$

$$\omega := \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad \omega = 146.608$$

$$M_H := \frac{P_H}{\omega} \quad M_H = 484.286 \quad M_c := M_H$$

$$M_{кр} := \lambda \cdot M_H \quad M_{кр} = 1.453 \times 10^3 \quad M_1 := 2.2 \cdot M_H \quad M_1 = 1.065 \times 10^3$$

$$M_2 := 1.2 \cdot M_c \quad M_2 = 581.143$$

$$x_p := x_1 + x_2 \quad x_p = 0.117$$

$$S_{кр} := \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_p^2}} \quad S_{кр} = 0.178$$

$$T_e := \frac{1}{\omega_0 \cdot S_{кр}} \quad T_e = 0.036$$

$$h := 0.001 \quad \text{крок моделювання}$$

$$T_{\max} := 1.5 \quad \text{час розрахунку}$$

$$N := \frac{T_{\max}}{h} \quad \text{кількість точок на графіку} \quad N = 1.5 \times 10^3$$

$$i := 0..N \quad t_i := h \cdot i \quad \text{значення часу в } i\text{-ій точці}$$



## Розрахунок шт учних реост ат них механічних характ ерист ик

Номинальний опір ротора :  $R_{рн} := \frac{E_{р0}}{\sqrt{3} \cdot I_n}$   $R_{рн} = 0.849$

Внутрішній активний опір ротора :  $R_p := R_{рн} \cdot S_n$   $R_p = 0.021$

Розрахунок опорів резисторів пускових ступенів

$$\lambda_m := \sqrt[4]{\frac{M_n}{M1 \cdot S_n}} \quad \lambda_m = 2.065$$

$$R_0 := R_p \cdot \lambda_m^3 \cdot (\lambda_m - 1) \quad R_0 = 0.199 \quad \text{Ом}$$

$$R_1 := R_p \cdot \lambda_m^2 \cdot (\lambda_m - 1) \quad R_1 = 0.096 \quad \text{Ом}$$

$$R_2 := R_p \cdot \lambda_m^1 \cdot (\lambda_m - 1) \quad R_2 = 0.047 \quad \text{Ом}$$

$$R_3 := R_p \cdot \lambda_m^0 \cdot (\lambda_m - 1) \quad R_3 = 0.023 \quad \text{Ом}$$

$$R_\Sigma := R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_0 \quad R_\Sigma = 0.386 \quad \text{Ом} \quad M_{кр} = 1.453 \times 10^3$$

Природня характеристика:

$$M_{пр}(\omega) := \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} + \frac{s_k}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}}$$

$\omega := 0..200$   
 $s_k = 0.195$

Критичне ковзання штучних характеристик, їх рівняння:

$$s_{кшт1} := \frac{R_\Sigma \cdot s_k}{R_p}$$

$$s_{кшт1} = 3.545$$

$$M_{шт1}(\omega) := \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} + \frac{s_{кшт1}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}}$$

$$s_{кшт2} := \frac{(R_\Sigma - R_0) \cdot s_k}{R_p}$$

$$s_{кшт2} = 1.717$$

$$M_{шт2}(\omega) := \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} + \frac{s_{кшт2}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}}$$

$$s_{кшт3} := \frac{(R_\Sigma - R_0 - R_1) \cdot s_k}{R_p}$$

$$s_{кшт3} = 0.831$$

$$M_{шт3}(\omega) := \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} + \frac{s_{кшт3}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}}$$

$$s_{кшт4} := \frac{(R_\Sigma - R_0 - R_1 - R_2) \cdot s_k}{R_p}$$

$$s_{\text{кшт4}} = 0.403$$

$$M_{\text{шт4}}(\omega) := \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} + \frac{s_{\text{кшт4}}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}}$$

$$R_{\text{дг}} := \frac{E_p 0}{\sqrt{3} \cdot I_n} \cdot (0.5 - S_H)$$

$$R_{\text{дг}} = 0.403 \quad \text{Ом}$$

$$s_{\text{кшт4}} = 0.403$$

Електромеханічна стала часу динамічного гальмування :

$$T_{\text{мдг}} := J_0 \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{кр}}}$$

$$T_{\text{мдг}} = 0.022 \quad \text{с}$$

Час динамічного гальмування :

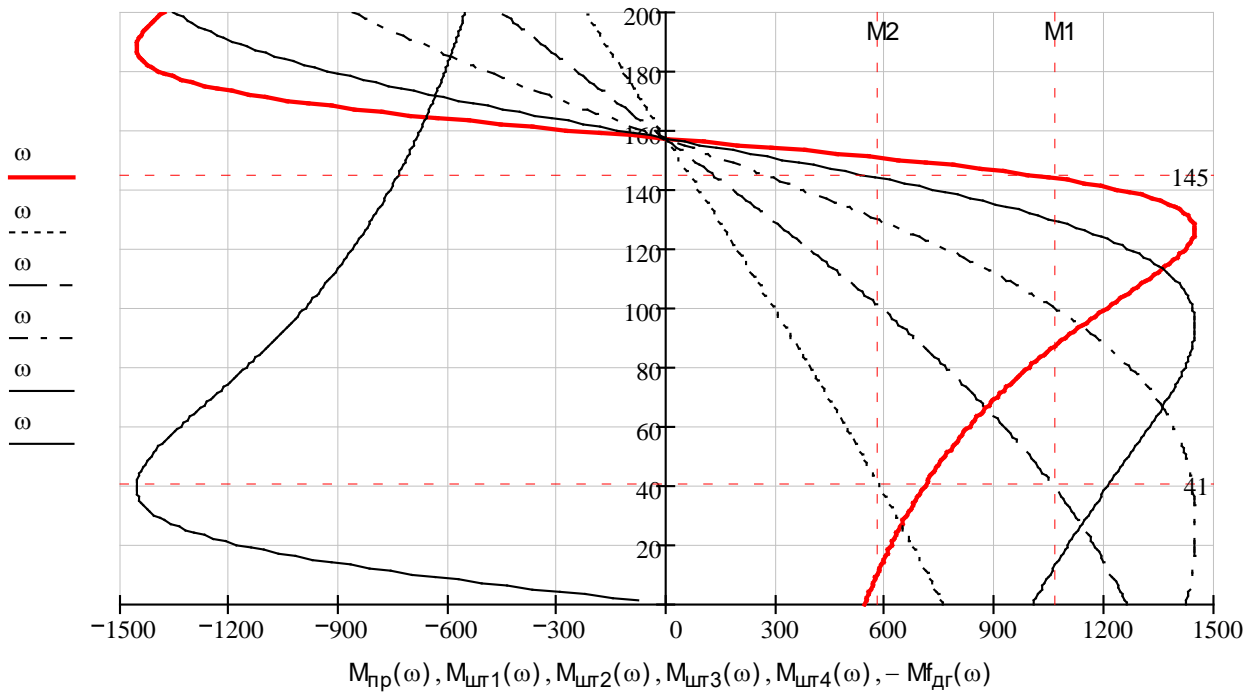
$$t_{\text{дг}} := T_{\text{мдг}} \cdot \left( s_k + \frac{0.5}{s_k} \right) \quad t_{\text{дг}} = 0.06 \quad \text{с}$$

$$M_{\text{кдг}} := M_{\text{кр}} \quad M_{\text{кдг}} = 1.453 \times 10^3$$

Рівняння характеристики динамічного гальмування:

$$s_{\text{кдг}} := 0.25$$

$$M_{\text{фдг}}(\omega) := \frac{2 \cdot M_{\text{кдг}}}{\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{s_{\text{кдг}}}{\frac{\omega}{\omega_0}}}$$



**Технічні дані крано-металургійних асинхронних двигунів з фазним ротором типу МТ і МТВ, 380 В, ТВ=25%**

Номер за списком	Тип	P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/хв	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор						Ротор					Момент інерції якоря J, кг·м <sup>2</sup>	Маса двигуна Q, кг
					cos φ		I <sub>с.н</sub> , А	I <sub>с.х</sub> , А	r <sub>с</sub> , Ом	x <sub>с</sub> , Ом	E <sub>р.н</sub> , В	I <sub>р.н</sub> , А	r <sub>р</sub> , Ом	x <sub>р</sub> , Ом	коэф. трансф. напруги k <sub>e</sub>		
					ном.	н.х.											
1	MT011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93	112	9,3	0,695	0,57	3,14	0,0212	51
2	MT012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58	144	11,0	0,67	0,585	2,5	0,0288	58
3	MT111-6	3,5	915	2,3	0,7	0,11	10,5	6,6	2,16	2,03	181	13,7	0,525	0,755	1,96	0,0488	76
4	MT112-6	5,0	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39	206	16,6	0,5	0,43	1,72	0,0675	88
5	MT211-6	7,5	935	2,5	0,7	0,09	20,8	11,8	0,68	1,07	255	19,8	0,44	0,88	1,38	0,115	120
6	MTB311-6	11	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,575	172	42,5	0,11	0,225	2,1	0,225	170
7	MTB311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21,0	14,0	0,88	0,965	251	20,5	0,47	0,72	1,41	0,275	170
8	MTB312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41	208	49,5	0,099	0,25	1,75	0,313	210
9	MTB312-8	11	710	2,8	0,66	0,1	33,0	22,1	0,53	0,56	182	41,0	0,13	0,23	1,96	0,387	210
10	MTB411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55,0	33,2	0,19	0,31	225	61,0	0,066	0,23	1,6	0,5	280
11	MTB411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43	207	49,5	0,103	0,25	1,73	0,538	280
12	MTB412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42,0	0,125	0,23	259	72,0	0,055	0,225	1,4	0,675	345
13	MTB412,8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32	234	59,0	0,09	0,24	1,53	0,75	345
14	MTB511-8	30	720	2,8	0,68	0,06	77	46	0,123	0,245	280	67,5	0,082	0,28	1,28	1,025	410
15	MTB512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17	322	76,5	0,072	0,24	1,12	1,4	500
16	MTB611-10	45	575	3,0	0,7	0,066	115	80	0,087	0,189	185	155	0,027	0,046	1,93	4,25	860
17	MTB612-10	60	578	3,0	0,72	0,061	145	93	0,055	0,142	245	153	0,033	0,062	1,44	5,25	1020
18	MTB613-10	80	580	3,0	0,72	0,056	190	120	0,042	0,107	320	155	0,038	0,078	1,12	6,25	1180
19	MTB711-10	100	584	2,8	0,67	0,053	255	180	0,025	0,096	275	230	0,017	0,066	1,28	10,25	1550
20	MTB712-10	125	587	2,8	0,66	0,045	320	230	0,016	0,08	345	225	0,02	0,082	1,01	12,7	1700

## Практичне заняття 6.

### Вибір електродвигунів та побудова навантажувальних діаграм

#### Розрахунок механічних характеристик виробничих механізмів з різними типами навантаження

Розрахунок механічної характеристики зі моментом опору

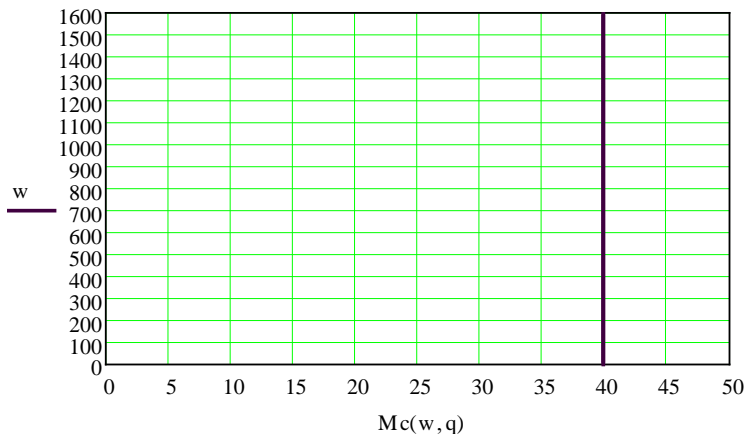
$M_0 := 10$  - момент тертя в рухомих частинах механізму

$M_{сн} := 40$  - момент опору при номінальній швидкості  $w_n$

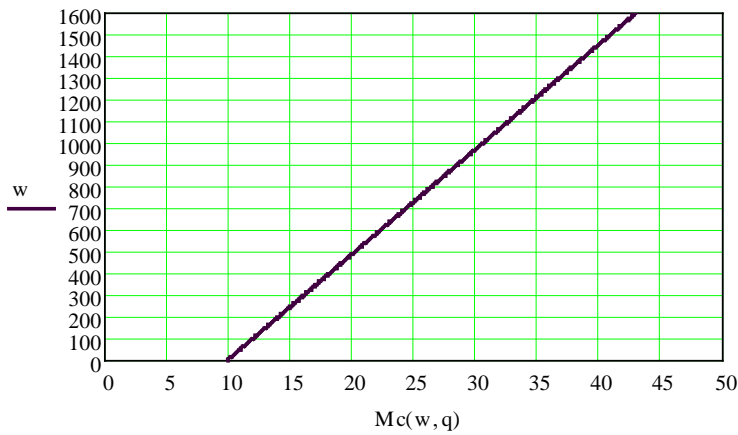
$w_n := 1450$  - номінальна швидкість механізму

$q := 0$  - показник степеня, що визначає характер залежності між моментом опору механізму і значенням швидкістю  $q=0$  - для сталого моменту  $M_c(w) = \text{const}$ : приводи піднімальних механізмів кранів, ліфтів, лебідки, поршневі помпи, з немінною висотою подачі, конвеєри зі сталим навантаженням, механізми, в яких основним моментом опору є тертя, шахтові підйомники і зрівноважена ливня.

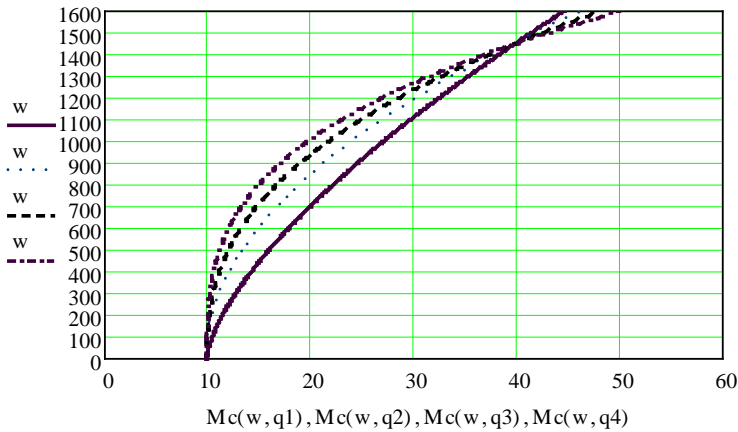
$$M_c(w, q) := M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left( \frac{w}{w_n} \right)^q \quad w := 0, 5.. 1600$$



$q := 1$  - показник степеня, що визначає характер залежності між моментом опору механізму і значенням швидкістю  $q=1$  - для лінійно зростаючого моменту опору  $M_c(w, q)$ : (привід генератора постійного струму з незалежним збудженням)

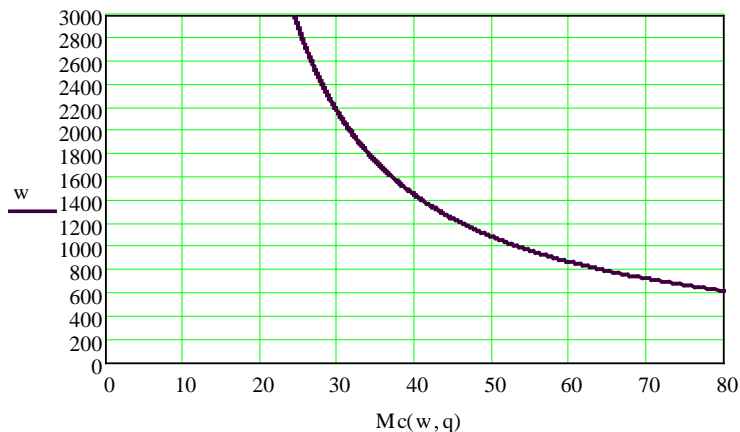


$q_1 := 1.5$  - показник степеня, що визначає характер залежності між моментом опору механізму і значенням швидкістю  $q = 2..3$  - для параболічної характеристики навантаження зі зростаючим опором від збільшення швидкості зростаючого моменту опору  $M_c(w, q)$ : приводи вентиляторів, відцентрові помпи, компресори, гребні гвинти кораблів.



$w := 0,5..3000$

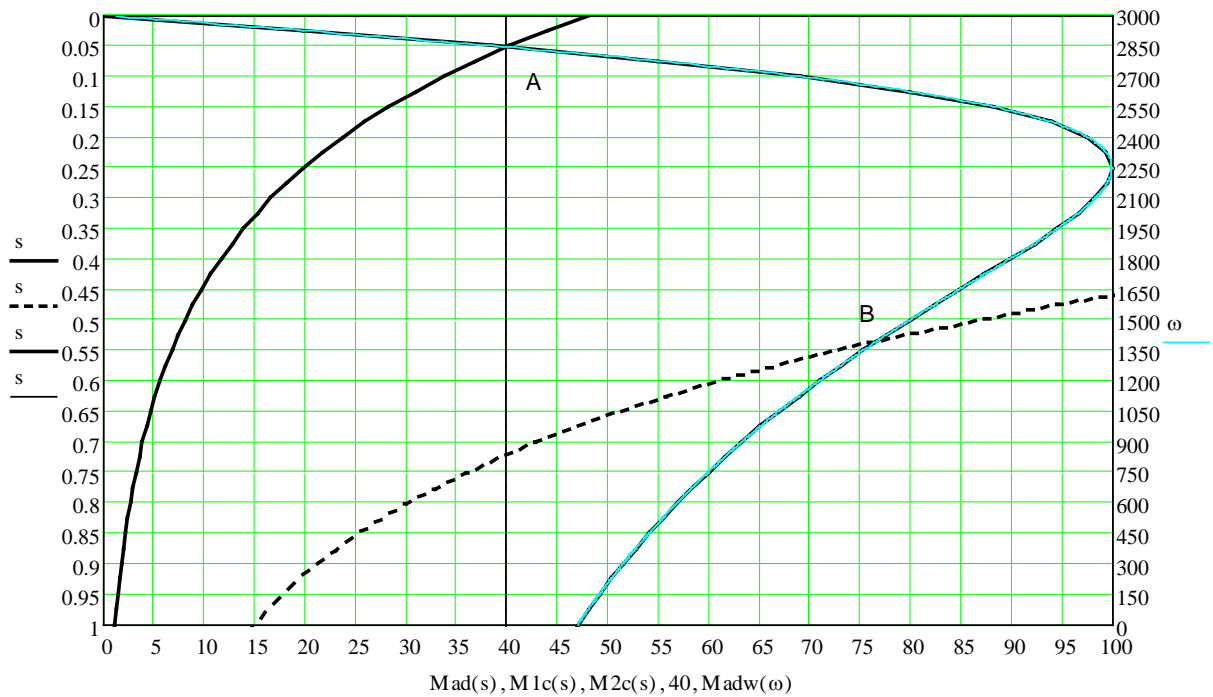
$q_n := -1$  - показник степеня, що визначає характер залежності між моментом опору механізму і значенням швидкості:  $q = -1$  - для характеристики нелінійно спадним моментом опору від збільшення швидкості, що мають приводи шпінделя токарних, свердлильних, фрезерних і інших верстатів, намотувачі стрічок (полоси металу, картону, паперу дроту у прокатному, паперовому чи ткацькому виробництвах.



$$s_{kr} := 0.25 \quad \underline{\underline{s}} := 1.25, 1.225..0 \quad M_{cn} = 40 \quad \omega_0 := 3000 \quad Madw(\omega) := \frac{2 \cdot 2.5 \cdot M_{cn}}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} + \frac{s_{kr}}{\omega_0}}$$

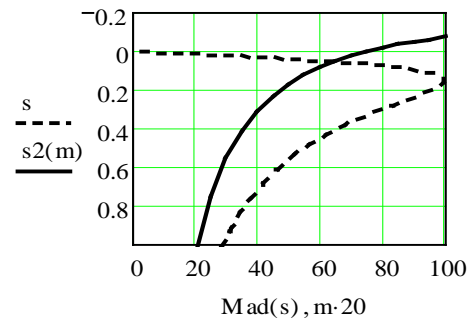
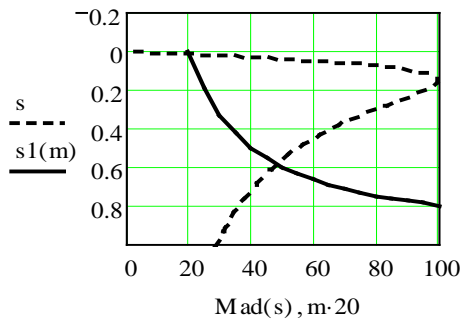
$$Mad(s) := \frac{2 \cdot 2.5 \cdot M_{cn}}{\frac{s}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s}} \quad M1c(s) := 500 \cdot (e^{-s \cdot 3.5}) - 0.1 \quad \omega := 0, 5..3000$$

$$M2c(s) := 1000 \cdot (e^{-s \cdot 3.5 - 3.03}) - 0.220$$

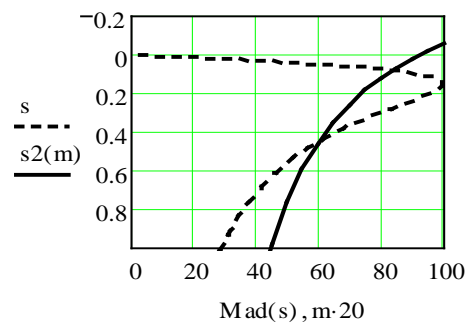
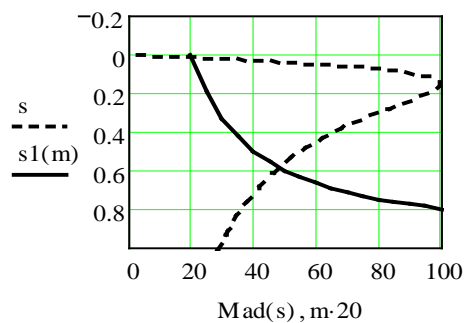


## 2. Дослідження умов статичної стійкості електроприводів ЗОВТ

$$\underline{\underline{Mad(s)}} := \frac{2 \cdot 2.5 \cdot M_{cn}}{\frac{s}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s}} \quad s1(m) := 1 - \frac{1}{m} \quad \underline{\underline{m}} := 1, 1.25..5 \quad s2(m) := \frac{m^{-1.25}}{0.75} - 0.25$$

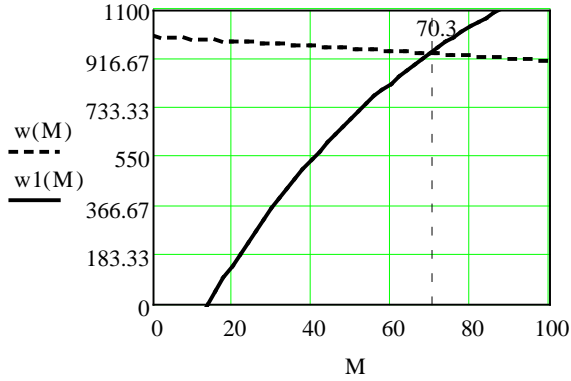


$$\underline{\underline{Mad(s)}} := \frac{2 \cdot 2.5 \cdot M_{cn}}{\frac{s}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s}} \quad \underline{\underline{s1(m)}} := 1 - \frac{1}{m} \quad m := 1, 1.25..5 \quad \underline{\underline{s2(m)}} := \frac{m^{-1.5}}{0.2} - 0.5$$





$k := 0.9$   
 $M := 0, 2.. 100$

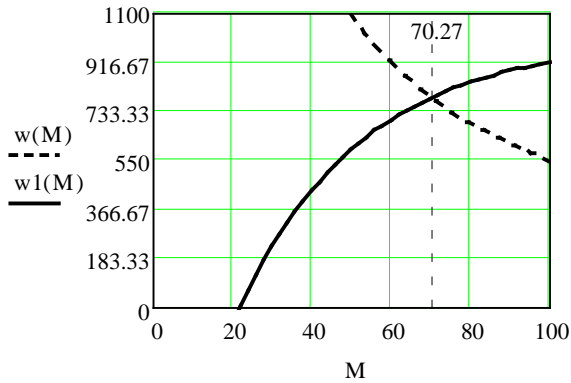


$w(M) := 1000 - k \cdot M$   
 $w1(M) := 2000 \cdot (1 - e^{-M \cdot 0.0158}) - 400$   
 $M := 40$   
 Given  
 $1000 - k \cdot M = 2000 \cdot (1 - e^{-M \cdot 0.0158}) - 400$

$M1 := \text{Find}(M)$   
 $\beta_d := \left( \frac{d}{dM} w(M) \right)^{-1} \rightarrow -1.11111111111111111111$   
 $\beta_m := \left( \frac{d}{dM} w1(M) \right)^{-1} \rightarrow .59537011333821625346e-1$

$\beta_d - \beta_m = -1.171$  Статично стійкий режим

$k := 0.9$      $M := 0, 2.. 100$

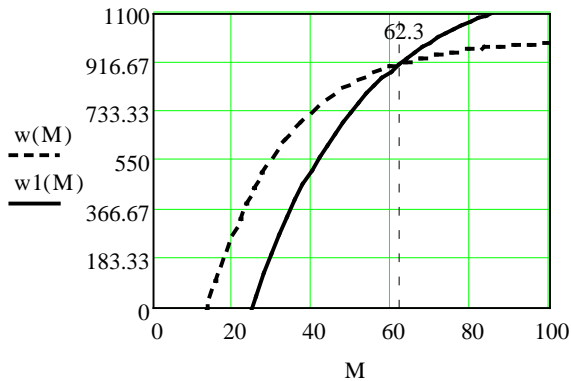


$w(M) := 55000 \cdot M^{-1}$   
 $w1(M) := 2000 \cdot (1 - e^{-M \cdot 0.03158}) - 1000$   
 $M := 40$   
 Given  
 $55000 \cdot M^{-1} = 2000 \cdot (1 - e^{-M \cdot 0.03158}) - 1000$

$M1 := \text{Find}(M)$   
 $\beta_d := \left( \frac{d}{dM} w(M) \right)^{-1} \rightarrow \frac{-8}{275}$   
 $\beta_m := \left( \frac{d}{dM} w1(M) \right)^{-1} \rightarrow .55996214464089316753e-1$

$\beta_d - \beta_m = -0.085$  Статично стійкий режим

$k := 0.9$      $M := 0, 2.. 100$



$w(M) := 2000 \cdot (1 - e^{-M \cdot 0.05}) - 1000$   
 $w1(M) := 3000 \cdot (1 - e^{-M \cdot 0.035}) - 1750$   
 $M := 40$   
 Given  
 $w(M) = w1(M)$

$M1 := \text{Find}(M)$      $M1 = 62.327$   
 $\beta_d := \left( \frac{d}{dM} w(M) \right)^{-1} \rightarrow .73890560989306502274e-1$   
 $\beta_m := \left( \frac{d}{dM} w1(M) \right)^{-1} \rightarrow .38620952065187377021e-1$

$\beta_d - \beta_m = 0.035$  Статична стійкість відсутня