

## СОДЕРЖАНИЕ

Завдання для курсової роботи.....	3
1. Попередній вибір приводного електродвигуна.....	3
2. Зведення параметрів механізму до вала двигуна.....	4
3. Розрахунок та побудування природної механічної характеристики двигуна $\omega = f(M)$ .....	5
4. Розрахунок навантажувальної діаграми двигуна.....	6
5. Розрахунок опорів пускових резисторів і резистора гальмування противключенням.....	8
6. Розрахунок штучних механічних характеристик двигуна.....	11
7. Розрахунок механічної та електромеханічної характеристик динамічного гальмування двигуна.....	13
8. Вибір релейної системи керування електроприводом.....	16
9. Розрахунок залежностей моменту і швидкості у функції часу в перехідних режимах роботи двигуна.....	17
10. Розрахунок варіанта реалізації блоку додаткових резисторів в роторному колі.....	21
11. Перевірка двигуна за нагрівом.....	22
Висновки.....	23
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	24

## Завдання для курсової роботи

Розрахувати характеристики системи електроприводу переміщення із заданою навантажувальною функцією  $M_M(t)$ , що відображає залежність від часу моменту статичного навантаження механізму для повторно-короткочасного режиму роботи.

У системі електропривода повинні буди передбачені реостатний пуск двигуна і кілька ступеней та припинення руху електричним гальмуванням з проти включенням, динамічним гальмуванням або їх комбінацією.

Вхідні дані механізму переміщення зведені у таблицю:

№	$M_M$	$J_M$	$t_{m1}$	$t_{m2}$	ПВ	$\eta$	$\omega_M$
п/п	Нм	Нмс <sup>2</sup>	с	с	%		с <sup>-1</sup>
14	2500	1200	12	14	40	0,95	10

де:

$M_M$  – момент сил навантаження на валу механізму;

$J_M$  – момент інерції механізму;

$t_{m1}$ ,  $t_{m2}$  – тривалості роботи механізму у прямому та зворотному напрямках відповідно;

$$t_{\xi} = \frac{t_{m1} + t_{m2}}{ПВ} = \frac{12 + 14}{0,4} = 65 \quad \text{– тривалість циклу навантаження механізму;}$$

ПВ – відносна тривалість включення двигуна;

$\eta$  – ККД механічної передачі механізму;

$\omega_M$  – кутова частота обертання валу механізму.

Навантажувальна діаграма та діаграма кутової частоти механізму зображені на рисунку 1.

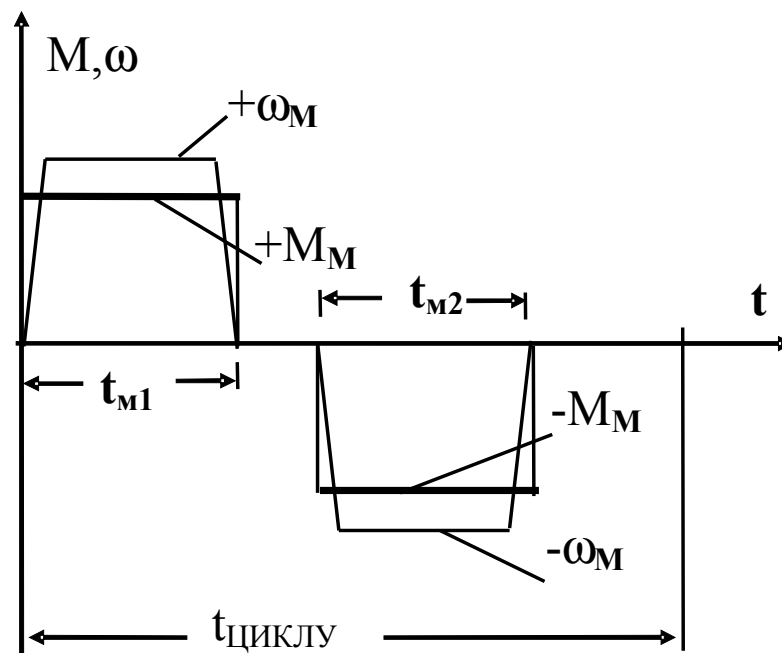


Рисунок 1. Навантажувальна та частотна діаграми роботи механізму переміщення

## 1. Попередній вибір приводного електродвигуна

Еквівалентна потужність навантаження механізму:

$$P_3 \approx K_3 \frac{\omega_M \times M_M}{\eta} \times \sqrt{\frac{P_B}{P_{B_H}}} = 1,5 \times \frac{10 \times 2500}{0,95} \times 1 = 39473,7$$

де  $K_3 = 1,5$  – коефіцієнт запасу потужності.

Попередньо обираємо двигун краново-металургійної серії з  $P_{B_H} = 40\%$  і  $P_H > P_3$ .

Паспортні дані асинхронного двигуна з фазним ротором, що пропонується до використання для  $P_{B_H} = 40\%$ , що живиться від мережі з лінійною напругою 380 В і частотою 50 Гц:

Тип	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мін	$M_H / M_H$	Статор				Ротор						
				$\cos \varphi_0$	$I_{CH}$ , А	$I_{CX}$ , А	$r_c$ , Ом	$x_c$ , Ом	$E_{PH}$ , В	$I_{PH}$ , А	$r_p$ , Ом	$x_p$ , Ом	$k_e$	$J_{дв}$ , кгм <sup>2</sup>
МТМ612-10	50	577	2,8	0,06	114,0	66,0	0,088	0,176	223	140,0	0,0313	0,0625	1,5	5,25

У таблиці представлені наступні дані двигуна:  $P_H$ ,  $n_H$ ,  $J_{об}$ ;  $M_M/M_H$  – кратність максимального моменту;  $I_{CH}$  – номінальний струм обмотки статора (фази обмотки статора з'єднані зіркою);  $\cos \varphi_0$  – коефіцієнт потужності двигуна у режимі холостого ходу;  $I_{CX}$  – струм холостого ходу обмотки статора при номінальній напрузі;  $r_c$ ,  $r_p$  – активні опори фаз статора і ротора (опори обмоток представлені у нагрітому стані);  $x_c$ ,  $x_p$  – індуктивні опори розсіювання фаз статора і ротора;  $E_{PH}$  – лінійне значення ЕРС ррозіркненої обмотки ротора при номінальній напрузі обмотки статора (фази обмотки ротора з'єднані зіркою);  $I_{PH}$  – номінальний струм обмотки ротора;  $k_e$  – коефіцієнт трансформації напрузі.

## 2. Зведення параметрів механізму до вала двигуна

Момент статичного навантаження, приведений до вала двигуна:

$$M_{H_3} = \frac{M_M}{i \times \eta} = \frac{M_M \times \omega_n}{\omega_M \eta} = \frac{2500 \times 60,4}{10 \times 0,95} = 435,5$$

де  $i = \frac{\omega_n}{\omega_M} = \frac{60,4}{10} = 6,04$  – передавальне число редуктора;  $\omega_n = n_H \pi / 30 = 60,4 \text{ }^{-1}$  – номінальна ктова частота вала двигуна.

Приведений до вала двигуна момент інерції самого двигуна і механізму:

$$J = J_{об} + J_{мех} = J_{об} + 1,05 \frac{J_M}{i^2} = 5,25 + 1,05 \frac{1200}{6,04^2} = 39,76$$

### 3. Розрахунок та побудовання природної механічної характеристики двигуна $\omega = f(M)$

Кутова частота обертання поля статора дорівнює:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi 50}{5} = 20\pi \text{ рад/с} ,$$

де  $f_1 = 50$  Гц – частота мережі живлення;  $p = 5$  – кількість пар полюсів двигуна.

Кутова частота обертання ротора визначається вираженням:

$$\omega = \omega_0(1-s) , \quad (3.1)$$

де  $s$  – ковзання двигуна.

Електромагнітний момент для будь-якого значення ковзання визначається вираженням:

$$M = \frac{2M_k(1+as_k)}{2as_k + \frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} , \quad (3.2)$$

де  $a = R_1/R_2'$ ;  $M_k, s_k$  – критичний момент двигуна і відповідні критичні значення ковзання;  $R_1, R_2'$  – активні опори обмоток статора і ротора еквівалентної Г-подібної схеми заміщення АД (рис. 1, б).

Величини критичного моменту і ковзання машини визначаються вираженнями:

$$M_k = \frac{3U_{1n}^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]} ; \quad (3.3)$$

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} , \quad (3.4)$$

де  $X_k = X_1 + X_2'$  – індуктивний опір короткого замикання асинхронного двигуна;

$$U_{1n} = \frac{U_{1\lambda}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4 \text{ – номінальне фазне значення напруги обмотки статора (обмотки}$$

з'єднані зіркою);  $R_1, R_2', X_1, X_2'$  – активні та індуктивні опори Г-образної схеми заміщення АД (рис. 2, б), отримані шляхом перерахунку опорів Т-образної схеми заміщення за допомогою коефіцієнта  $c_1$ . Приймаємо коефіцієнт перетворення параметрів схем (рис. 2), що дорівнює 1 і розраховуємо відповідні опори:

$$c_1 = 1;$$

$$R_1 = c_1 r_c = r_c = 0,088 \text{ Ом};$$

$$R_2' = c_1^2 r_2' = c_1^2 k_e^2 r_p = 1 \cdot 1,5^2 \cdot 0,0313 = 0,0704 \text{ Ом};$$

$$X_1 = c_1 x_c = x_c = 0,176 \text{ Ом};$$

$$X_2' = c_1^2 x_2' = c_1^2 k_e^2 x_p = 1 \cdot 1,5^2 \cdot 0,0625 = 0,1406 \text{ Ом}.$$

Критические момент и скольжение машины по (1.3) и (1.4) соответственно равны:

$$M_k = \frac{3 \cdot 219,4^2}{2 \cdot 20\pi [0,088 + \sqrt{0,088^2 + (0,176 + 0,1406)^2}]} = 2826,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_k = \frac{0,0704}{\sqrt{0,088^2 + (0,176 + 0,1406)^2}} = 0,216.$$

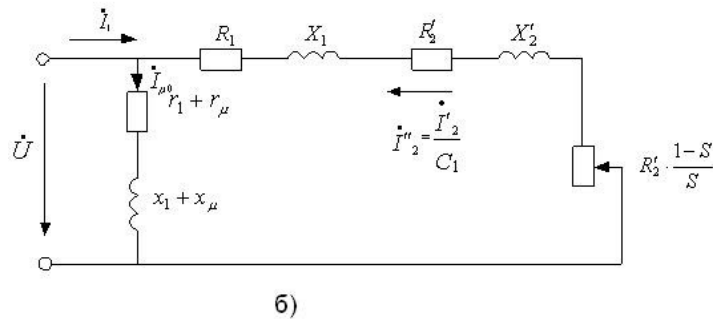
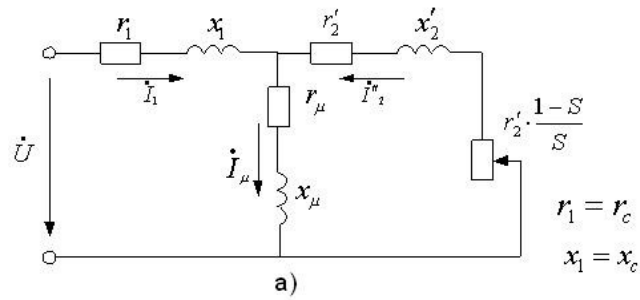


Рисунок 2. Схеми заміщення асинхронного двигуна, Т-подібна (а) і Г-подібна (б).

Номінальне ковзання двигуна дорівнює:

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{60 \frac{\omega_0}{2\pi} - n_n}{60 \frac{\omega_0}{2\pi}} = \frac{600 - 577}{600} = 0,038$$

Номінальний момент двигуна згідно (1,2) дорівнює:

$$M_n = \frac{2 \cdot 2826,3 \cdot \left(1 + \frac{0,088}{0,0704} \cdot 0,216\right)}{2 \frac{0,088}{0,0704} \cdot 0,216 + \frac{0,038}{0,216} + \frac{0,216}{0,038}} = 1118,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Значення кутової частоти ротора розраховуються згідно (1.1).

Таблиця з 12-ти значень механічної характеристики приведена нижче:

$s$	0	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\omega$ , рад/с	$\frac{62,83}{2}$	56,55	53,4	50,26	43,98	37,7	31,42	25,13	18,85	12,57	6,28	0
$M$ , Н·м	0	$\frac{2262}{7}$	$\frac{2682}{7}$	$\frac{2819}{8}$	$\frac{2706}{7}$	$\frac{2440}{2}$	$\frac{2172}{1}$	$\frac{1937}{7}$	$\frac{1740}{2}$	$\frac{1574}{6}$	$\frac{1435}{3}$	1317,2

Графік природної механічної характеристики АД представлений на рисунку 3.

#### 4. Розрахунок навантажувальної діаграми двигуна

Кутову швидкість дигуна, що відповідає моменту статичного навантаження можна визначити графічно за природною механічною характеристикою (рис. 3) і вона дорівнює:

$$\omega = 61,96 \text{ рад/с}$$

Розрахункова тривалість включення двигуна дорівнює стандартній:

$$ПВ_p = ПВ = 40\%$$

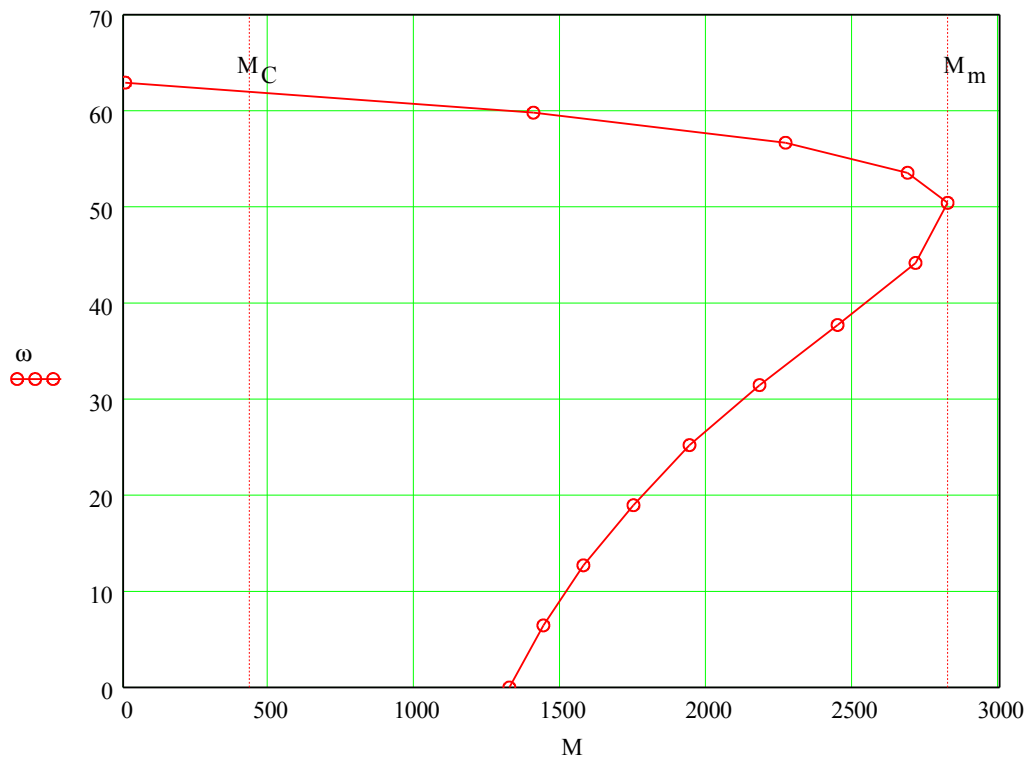


Рисунок 3. Природна механічна характеристика АД.

Графік навантажувальної функції  $F(t)$  двигуна представлений на рисунку 4, на якому не показані динамічні режими роботи двигуна.

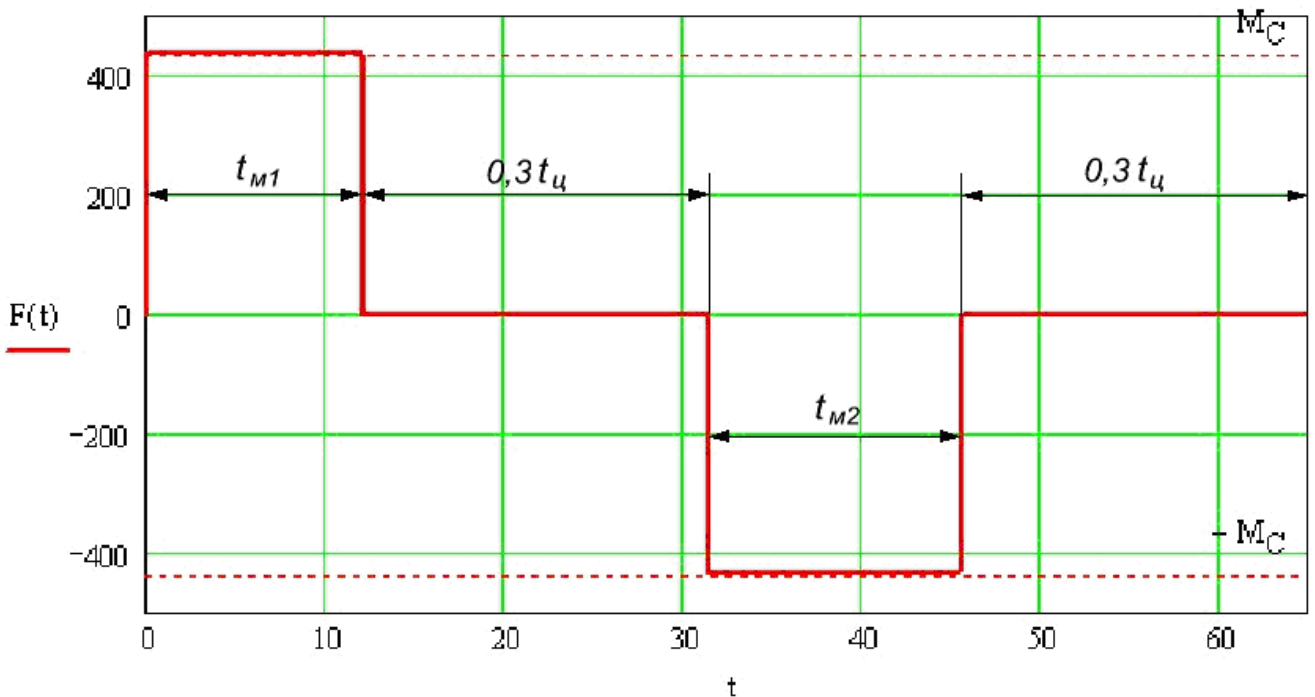


Рисунок 4. Графік навантажувальної функція двигуна.

## 5. Розрахунок опорів пускових резисторів і резистора гальмування противключенням

Для забезпечення необхідної продуктивності механізму необхідно забезпечити достатню швидкість пуску і гальмування двигуна, що здійснюється підтримуванням надлишкового пускового або гальмівного моменту. Для АД з фазним ротором підтримування надлишкового моменту можливо введенням резистивних ступеней у коло ротора, як це зображено на рисунку 5.

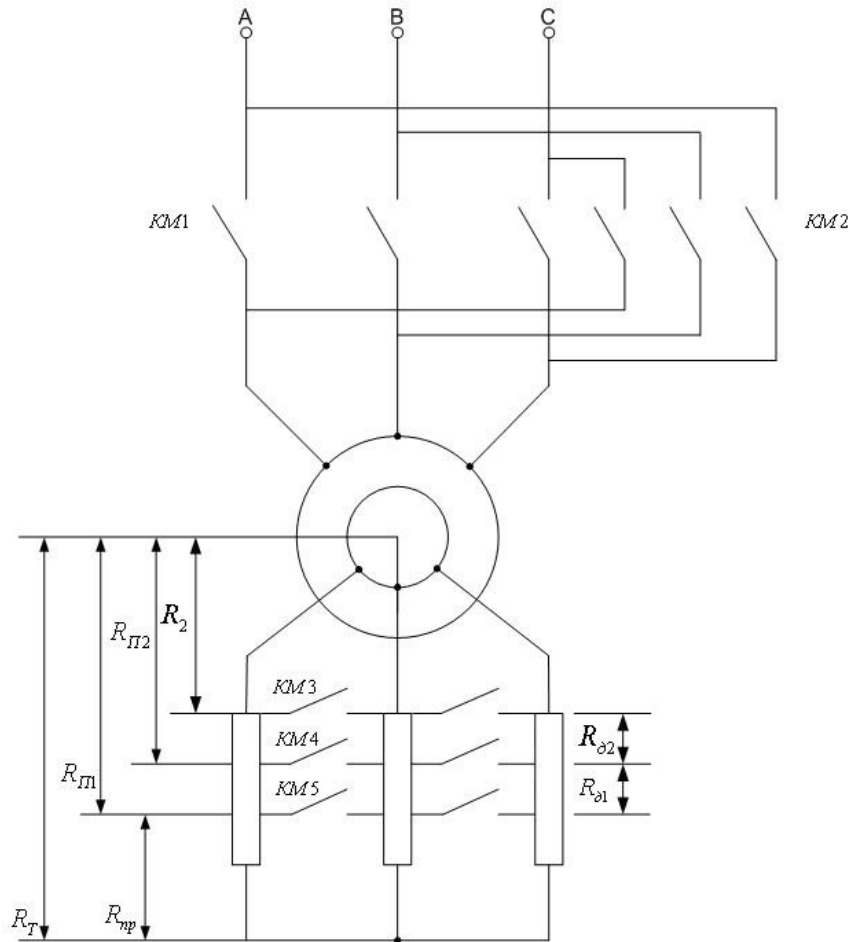


Рисунок 5. Електрична схема пуску у дві ступені і гальмування противключенням АД з фазним ротором

За для здійснення двохступінчастого пуску, при включенні обмотки статора АД у коло, необхідно щоб контакти КМ3 і КМ4 були різімкнені, а контакти КМ5 замкнені у роторному колі двигуна (см. рис 5.).

Максимальне значення пускового моменту приймаємо таким, що дорівнює 0,9 від критичного:

$$M_1 = 0,9 \cdot M_c = 0,8 \cdot 2826,3 = 2543,66 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Величину моменту переключення пускових ступіней для пуску під навантаженням приймаємо таким, що дорівнює 3,0 Мс:

$$M_2 = 3,0 \cdot M_c = 3,0 \cdot 135,5 = 406,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

**Примітка.** Значення моментів  $M_1$  і  $M_2$  обираються у межах припустимих значень надлишкових моментів для даного типу двигуна з урахуванням отримання мінімального числа пускових ступіней.

Розрахунок пускових опорів здійснимо графічним способом за допомогою природної механічної характеристики (рис. 6). Згідно побудованням на рисунку 5, повні активні опори роторного кола двигуна визначаються співвідношеннями:

$$R_{II2} = r_p \frac{kc}{ka}; R_{III} = r_p \frac{kd}{ka} .$$

Довжини відповідних відрізків на рисунку 6 виразимо у міліметрах і тоді повні опори роторного кола на різних ступінях будуть дорівнювати:

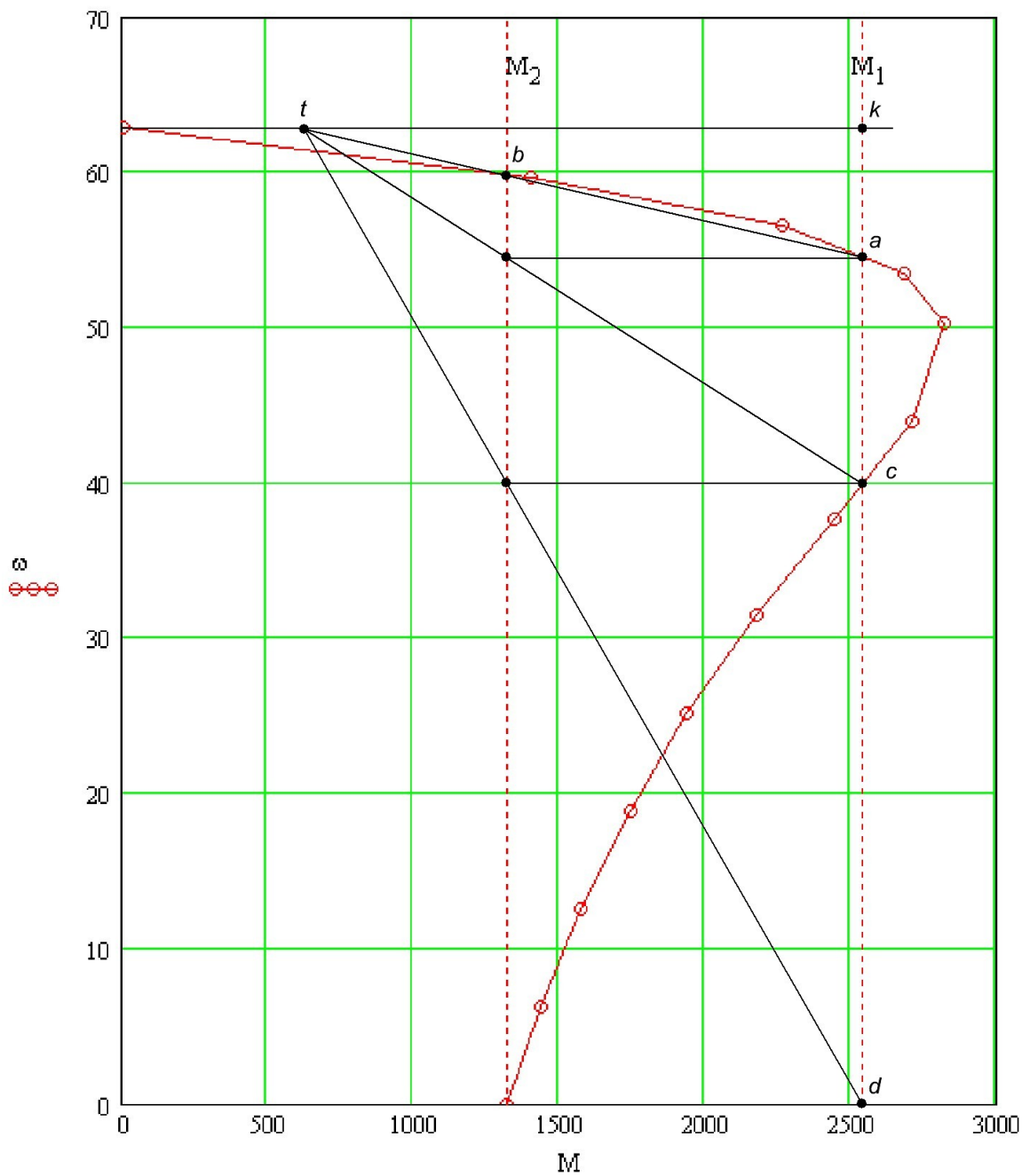


Рисунок 6. Пусковая диаграмма на фоне естественной механической характеристики.

$$R_{II2} = 0,0313 \frac{42,1}{15,3} = 0,0861 \text{ Ом};$$

$$R_{III} = 0,0313 \frac{115,7}{15,3} = 0,2367 \text{ Ом}.$$



Опори пускових ступіней також виражаються крізь співвідношення відповідних відрізків на рисунку 6:

$$R_{\rho 2} = r_p \frac{ac}{ka} = 0,0313 \frac{26,8}{15,3} = 0,0548 \text{ Ом};$$

$$R_{\rho 1} = r_p \frac{cd}{ka} = 0,0313 \frac{73,6}{15,3} = 0,1506 \text{ Ом}.$$

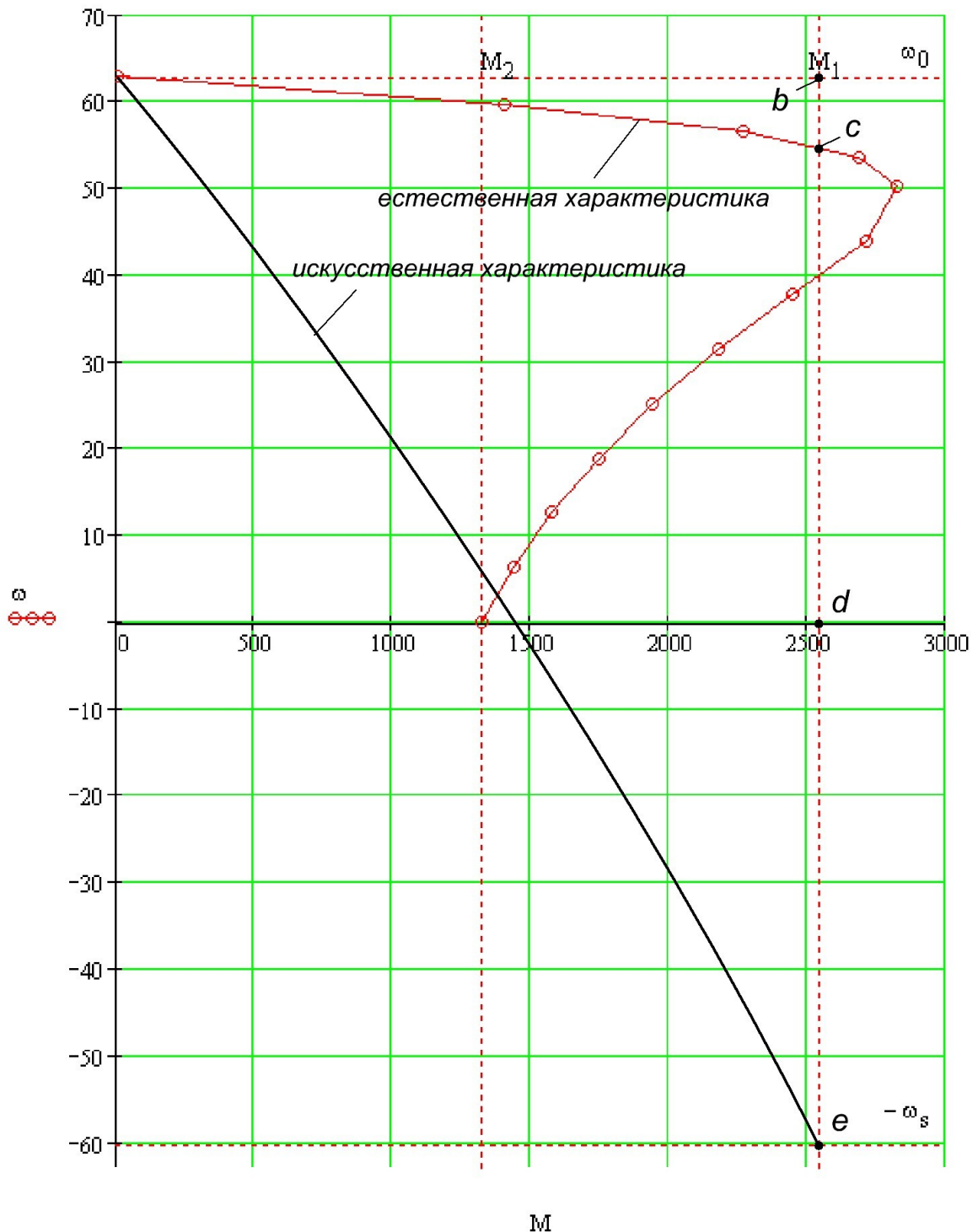


Рисунок 7. До розрахунку опору резистора гальмування противключенням.

За для здійснення режиму гальмування противключенням необхідно змінити чергування фаз обмотки статора АД, змінивши місцями кінці сусідніх фазних провідників, що виходять з мережі живлення. У схемі (рис. 5) цей режим здійснюється розмиканням контактів КМ1 і

замиканням КМ2, а у роторному колі розмикаються контакти усіх пускових ступіней, включаючи КМ5. Повний опір роторного кола у режимі гальмування дорівнює  $R_T$ . Визначимо його для точки  $e$  (рис. 7), крізь яку повинна пройти штучна механічна характеристика двигуна при цьому опорі роторного кола за для значення моменту двигуна  $M_1$  і кутової швидкості  $-\omega_c$ . Таким чином, повний опір можна визначити крізь співвідношення відповідних відрізків:

$$R_T = r_p \frac{be}{bc} = 0,0313 \frac{134,8}{8,9} = 0,4741 \text{ Ом}$$

Опір додаткового резистора гальмування визначається вираженням:

$$R_{np} = R_T - R_{r1} = 0,4741 - 0,2367 = 0,2374 \text{ Ом}$$

## 6. Розрахунок штучних механічних характеристик двигуна

За для розрахунку штучних механічних характеристик (МХ) двигуна необхідно виконувати приведені величини пускових і тормозних опорів до статора, згідно з Г-образною схемою заміщення двигуна (рис. 2, б):

$$R'_{r1} = R_{r1} k_e^2 = 0,2367 \cdot 1,5^2 = 0,5326 \text{ Ом};$$

$$R'_{r2} = R_{r2} k_e^2 = 0,0861 \cdot 1,5^2 = 0,1938 \text{ Ом};$$

$$R'_T = R_T k_e^2 = 0,4741 \cdot 1,5^2 = 1,0667 \text{ Ом}.$$

Відношення активних опорів статора до приведенного опору ротора за для пускових і гальмівного режимів дорівнюють:

$$a_{r1} = \frac{R_1}{R'_{r1}} = \frac{0,088}{0,5326} = 0,1502;$$

$$a_{r2} = \frac{R_1}{R'_{r2}} = \frac{0,088}{0,1938} = 0,4128;$$

$$a_T = \frac{R_1}{R'_T} = \frac{0,088}{1,0667} = 0,075.$$

Значення критичних ковзань при пускових і тормозному режимах двигуна дорівнюють:

$$s_{к,r1} = \frac{R'_{r1}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{0,5326}{0,3266} = 1,6307;$$

$$s_{к,r2} = \frac{R'_{r2}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{0,1938}{0,3266} = 0,5934;$$

$$s_{к,T} = \frac{R'_T}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{1,0667}{0,3266} = 3,2632.$$

Нижче приведена таблиця, у яку зведені усі розраховані вище величини за для трьох штучних режимів роботи двигуна:

Режим роботи	$R_{рот.}, \text{ Ом}$	$a$	$s_k$
1-й пусковий	0,5326	0,150 2	1,6307
2-й пусковий	0,1938	0,412 8	0,5934
Гальмівний	1,0667	0,075	3,2632

Штучні механічні характеристики будуються з застосуванням виражень (3.1) і (3.2). Розрахунок значень залежності  $\omega = f(M)$  за для природного, пускового і тормозного режимів зведений нижче у таблицю.

Таблиця розрахункових значень природної та штучних МХ двигуна

s	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$\omega, \text{rad/c}$	62,8 3	59,6 9	56,5 3	53,4 1	50,2 7	43,9 8	37,7	31,4 2	25,1 3	18,8 5	12,5 7	6,28	0	-6,28	-12,57	-18,85	-25,13	-31,42	-37,7	-43,98
$M \cdot 10^3, \text{H}\cdot\text{M}$	0	1,39 8	2,26 3	2,68 3	2,82	2,70 7	2,44	2,17 2	1,93 8	1,74	1,57 5	1,43 5	1,31 7	1,21 6	1,129	1,053	0,986	0,927	0,87 5	0,828
$M_{\text{П1}} \cdot 10^3, \text{H}\cdot\text{M}$	0	0,21 2	0,41 7	0,61 4	0,80 3	1,15 2	1,46 2	1,73 4	1,96 8	2,16 6	2,33 1	2,46 6	2,57 4	2,65 9	2,723	2,769	2,8	2,818	2,82 6	2,824
$M_{\text{П2}} \cdot 10^3, \text{H}\cdot\text{M}$	0	0,56 6	1,06 8	1,49 8	1,85 5	2,36 7	2,65 8	2,79 3	2,82 6	2,79 6	2,72 8	2,64	2,54 2	2,44 1	2,341	2,243	2,15	2,062	1,97 8	1,9
$M_{\text{T}} \cdot 10^3, \text{H}\cdot\text{M}$	0	0,10 7	0,21 2	0,31 5	0,41 7	0,61 4	0,80 2	0,98 1	1,15	1,31	1,46 1	1,60 1	1,73 2	1,85 4	1,966	2,07	2,164	2,251	2,32 9	2,4

На рисунку 8 представлені графіки природної та штучних МХ двигуна і вказані переходи від одного режиму роботи до іншого у процесі пуску та гальмування двигуна. Відповідні моменти мають позначення, що застосовуються при побудованні механічних характеристик на ЭОМ:

$M \equiv M$  - природна МХ;

$M_{p1} \equiv M_{\text{П1}}$  - штучна МХ при  $R_{\text{рот}} = R_{\text{П1}}$ ;

$M_{p2} \equiv M_{\text{П2}}$  - штучна МХ при  $R_{\text{рот}} = R_{\text{П2}}$ ;

$M_r \equiv M_{\text{T}}$  - штучна МХ при  $R_{\text{рот}} = R_{\text{T}}$ .

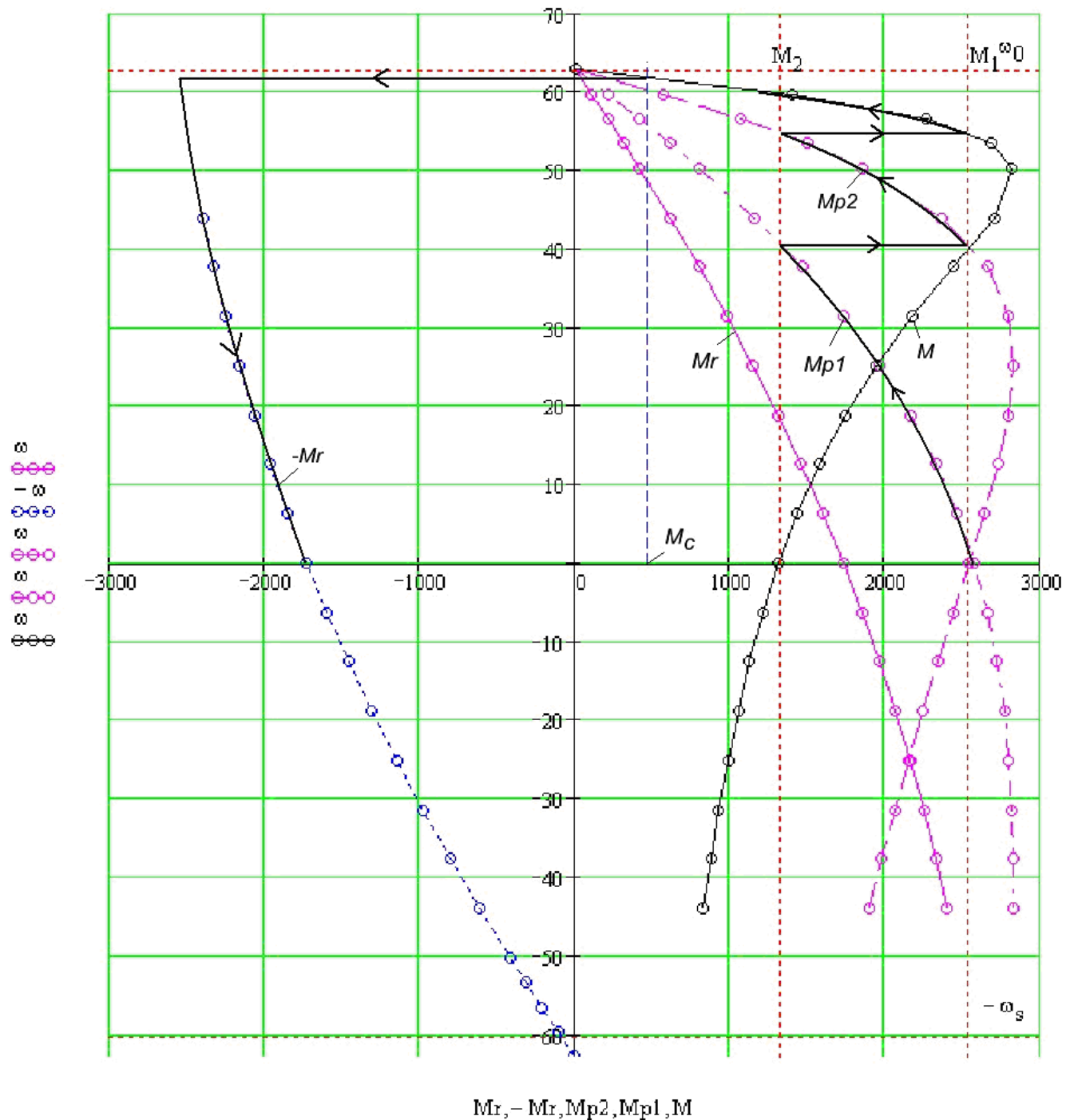


Рисунок 8. Сімейство МХ асинхронного двигуна з фазним ротором до опису процесу двохступінчастого пуску і гальмування.

## 7. Розрахунок механічної та електромеханічної характеристик динамічного гальмування двигуна

Динамічне гальмування – це сприятливий варіант гальмування механізмів пересування, який передбачає живлення статора двигуна від мережі постійного струму за схемою, що зображена на рисунку 9.

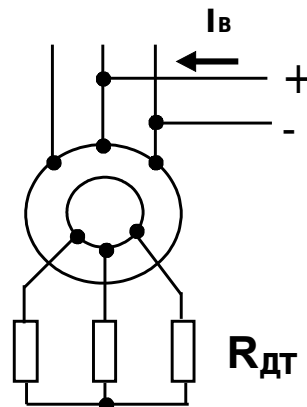


Рисунок 9. Схема живлення статора двигуна постійним струмом у режимі динамічного гальмування

Розрахунок характеристик динамічного гальмування двигуна можливий за допомогою схеми заміщення двигуна для цього режиму, що зображена на рисунку 10.

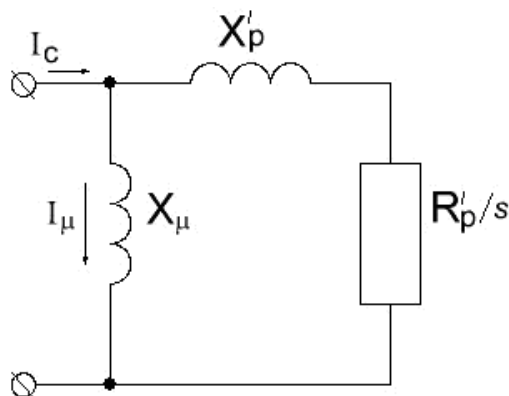


Рисунок 10. Схема заміщення асинхронного двигуна для режиму динамічного гальмування

Зведені до статора параметри ротора:

$$R'_p = k_e^2 R_{p/s} = 1,5^2 \cdot 0,0313 = 0,0704 \quad ;$$

$$X'_p = k_e^2 X_{p/s} = 1,5^2 \cdot 0,063 = 0,1406 \quad .$$

Еквівалентний трифазний струм статора (рис. 9):

$$I_{CB} = 0,816 I = 0,816 \cdot 166 = 135,456 \text{ A} \quad ,$$

де  $I_B$  – постійний струм збудження статора.

Функція залежності ЕРС двигуна від струму намагнічування апроксимована поліномом 4-го ступеню:

$$E(x) = E_H \cdot x \cdot (-0,02x^3 + 0,224x^2 - 0,92x + 1,72) \quad , \quad (7.1)$$

де:

$$E_H = \frac{E_{PH}}{\sqrt{3}} \times B = \frac{223}{\sqrt{3}} \times 1,5 = 193,1 \quad - \text{ номінальна ЕРС двигуна}; \quad x = \frac{I_\mu}{I_{CX}} \quad - \text{ відносний струм}$$

намагнічування.

Графік функції  $E(x)$  зображений на рисунку 10.

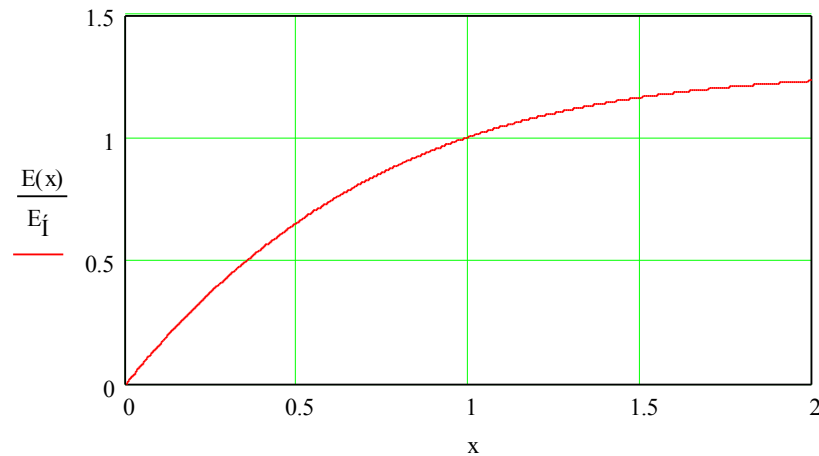


Рисунок 11. Графік функції  $E(x)$  у відносних одиницях

Струм намагнічування  $I_\mu$  може бути розрахований згідно вираження:

$$I_\mu = I_C \sqrt{\frac{(R'_p)^2 + (X'_p)^2 \times s^2}{(R'_p)^2 + (X_\mu + X'_p)^2 \times s^2}}, \quad (7.2)$$

де:

$X_\mu = E(x)/I_\mu$  - індуктивний опір намагнічування (рис. 9).

Оскільки залежність  $X_\mu$  від струму  $I_\mu$  є нелінійною, то для діапазону значень ковзання  $s$  величина  $X_\mu$  розраховується за допомогою процедури послідовного наближення:

$$X_\mu(s) := \left| \begin{array}{l} X_\mu \leftarrow X_{\mu 0} \\ v \leftarrow 0 \\ \text{while } |v - F(s, X_\mu)| \geq 0.001 \\ \quad \left| \begin{array}{l} I_\mu \leftarrow F(s, X_\mu) \\ x \leftarrow \frac{I_\mu}{I_{CX}} \\ X_\mu \leftarrow \frac{E(x)}{I_\mu} \\ v \leftarrow I_\mu \end{array} \right. \\ X_\mu \end{array} \right. \quad (7.3)$$

де:

$X_{\mu 0}$  - початкове наближення опору намагнічування;

$F(s, X_\mu)$  - вираження (7.2).

Для уточненого значення  $X_\mu$  можливо розрахувати значення зведеного до статора струму ротора у функції від ковзання та електромагнітний момент двигуна з відповідних виражень:

$$I'_p(s) = \frac{F(s, X_\mu(s)) \times X_\mu(s) \times s}{\sqrt{(R'_p)^2 + (X'_p)^2} \times s};$$

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

У таблицю 7.1 зведені обчислення величин  $X_\mu$ ,  $I_\mu$ ,  $I'_p$ ,  $M$  для діапазону значень ковзання  $s$  від -1 до 1.

S	-1	-0,7	-0,5	-0,2	-0,1	-0,05	-0,01	0	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	0,7	1
$X_\mu$ , Ом	4,829	4,808	4,773	4,525	4,023	2,878	1,551	1,514	1,551	2,878	4,023	4,525	4,773	4,808	4,829
$I_\mu$ , А	5,107	5,638	6,534	13,08	27,45	68,58	156,94	161,37	156,94	68,58	27,45	13,08	6,534	5,638	5,107
$I'_p$ , А	-156,8	-156,75	-156,69	-156,06	-153,74	-139,42	-34,55	0	34,55	139,42	153,74	156,06	156,69	156,75	156,8
$M$ , А	82,66	118,03	165,1	409,5	794,7	1307	401,5	0	-401,5	-1307	-794,7	-409,5	-165,1	-118,03	-82,66

Графіки механічної та електромеханічної характеристик зображені на рисунках 12 і 13 відповідно.

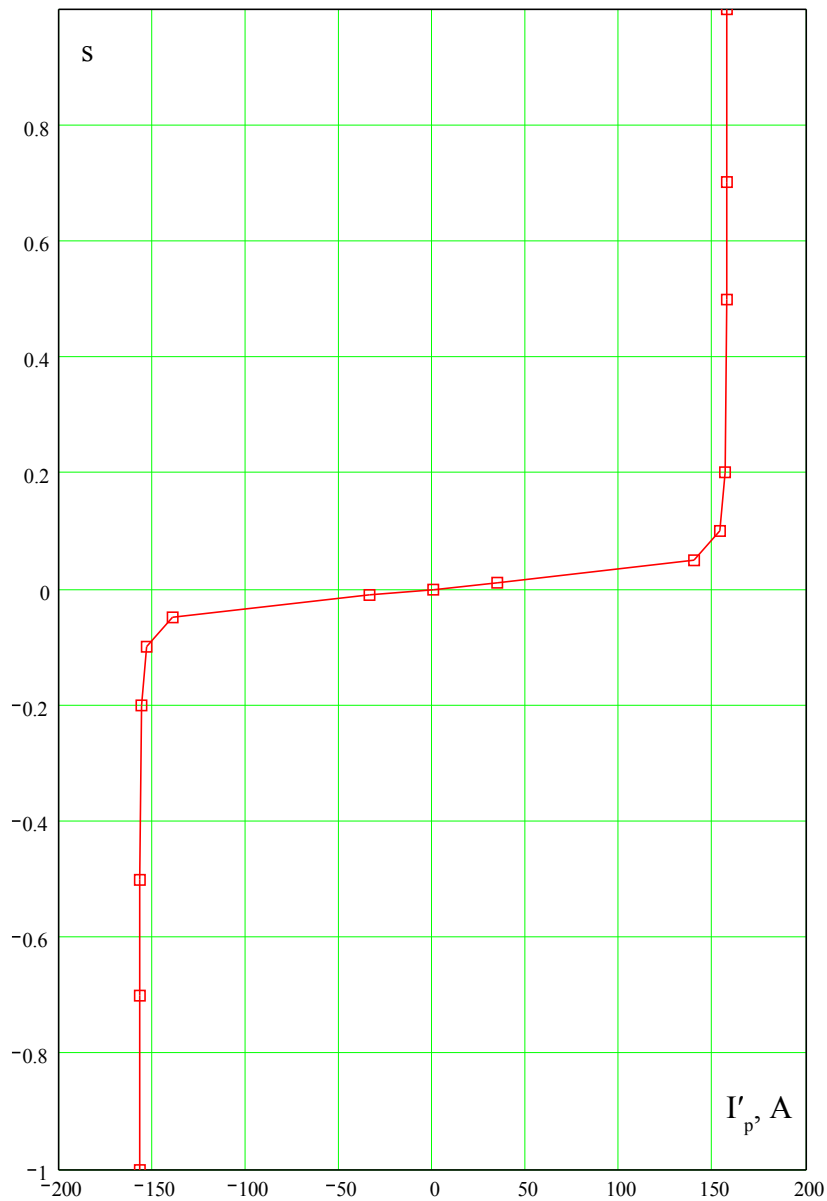


Рисунок 12. Електромеханічна характеристика двигуна в режимі динамічного гальмування



Рисунок 13. Механічна характеристика двигуна в режимі динамічного гальмування

## 8. Вибір релейної системи керування електроприводом

Пусковий та тормозний процеси двигуна можуть бути здійснені за допомогою логічної релейної системи керування.

Оскільки у механізмі пересування момент статичного навантаження має реактивний характер у будь-якому напрямку руху, доцільно створити схему релейного керування, яка забезпечує однакові характеристики електропривода в обох напрямках. На рисунку 14 зображена принципова схема що забезпечує розраховані режими роботи, а також захист двигуна від позаштатних режимів.

Схема включає контактори для комутації потужних контурів статора і ротора (Л, В, Н, Д, П, 1У, 2У), командоапарат КК з контактами КК0..КК4, реле для автоматичного переключення характеристик під час розгону або гальмування (1РУ, 2РУ, РД, РДТ), елементи для захисту та блокування.

Система дозволяє ручний (неавтоматичний) вибір характеристик.

Двигун може вмикатися до мережі живлення змінного струму. Три додаткових опори у роторних контурах  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  та  $R_{пр}$  дозволяють одержати три штучні характеристики.

Характеристика з максимальним опором може використовуватися тільки у режимі гальмування противмиканням. Дві інші – у режимі розгону або динамічного гальмування.

Вмикання електродвигуна до мережі постійного струму дозволяє реалізувати характеристики динамічного гальмування.

У режимі пуску без затримки у часі вмикається контактор **П** і система реалізує характеристику з двома додатковими опорами у роторі ( $R_{d1}+R_{d2}$ ). Потім втрачає живлення котушка **1РУ**. З затримкою у часі замикаються контакти **1РУ** у контурі контактора наступного ступеня (**1У**). Потужні контакти **1У** закорочують опір  $R_{d2}$ . Інший контакт **1У** розриває живлення котушки **2РУ**. Після відповідної затримки у часі замикаються контакти **2РУ** у контурі контактора наступного ступеня (**2У**). Додаткові опори виводяться з ротору і двигун працює на природній характеристиці. Таким чином реалізується автоматичний розгін двигуна у функції часу за допомогою реле **1РУ** та **2РУ** з поступовим виведенням із роторних контурів додаткових опорів  $R_{d1}$  та  $R_{d2}$ .

Переведення рукоятки командоапарату із одного крайового положення в інше створює режим гальмування противмиканням, який контролюється у функції частоти обертання (напруги у роторі) за допомогою реле **РП**.

Переведення рукоятки **КК** з робочого у нульове положення вмикає динамічне гальмування з контролем характеристик у функції часу за допомогою реле **1РУ**, **2РУ**. Тривалість режиму контролює реле **РД**.

Система забезпечує нульовий захист від мимовільного пуску (**РН**), захист від струмів короткого замикання (**РМ**, **2П**), захист від одночасного вмикання контакторів напрямку руху **В** та **Н**, примусове припинення динамічного гальмування при переведенні рукоятки **КК** в одне з робочих положень (**РБД**).

## 9. Розрахунок залежностей моменту і швидкості у функції часу в перехідних режимах роботи двигуна

Пусковий і гальмівний перехідні процеси кутової швидкості і моменту двигуна розрахуємо наближено, використовуючи статичні МХ (рис. 8) і приведені до валу двигуна рівняння руху електропривода:

$$M_{cp} - M_c = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (9.1)$$

де  $M_{cp}$  – середнє значення електромагнітного моменту, що розвиває двигун у інтервалі швидкості  $\Delta\omega$ ;  $\Delta\omega$  – приріст швидкості, яким задаються вільно, воно може бути постійним або змінним;  $\Delta t$  – приріст часу.

Розв'язуючи (9.1) відносно  $\Delta t$ , отримуємо:

$$\Delta t = J \frac{\Delta\omega}{M_{cp} - M_c}. \quad (9.2)$$

Підстановка значень  $M_{cp}$ ,  $\Delta\omega$  в (5.2) дозволяє визначити прирости часу для відповідних змін кутової швидкості, а також повний час від от початку навантажувального циклу.

Величину приросту кутової швидкості задамо різною для трьох інтервалів часу розгону двигуна і 4-го інтервалу гальмування:

$$1: \Delta\omega = 13,5 \text{ рад/с};$$

$$2: \Delta\omega = 3,55 \text{ рад/с};$$

$$3: \Delta\omega = 1,451 \text{ рад/с};$$

$$4: \Delta\omega = -20,066 \text{ рад/с}.$$



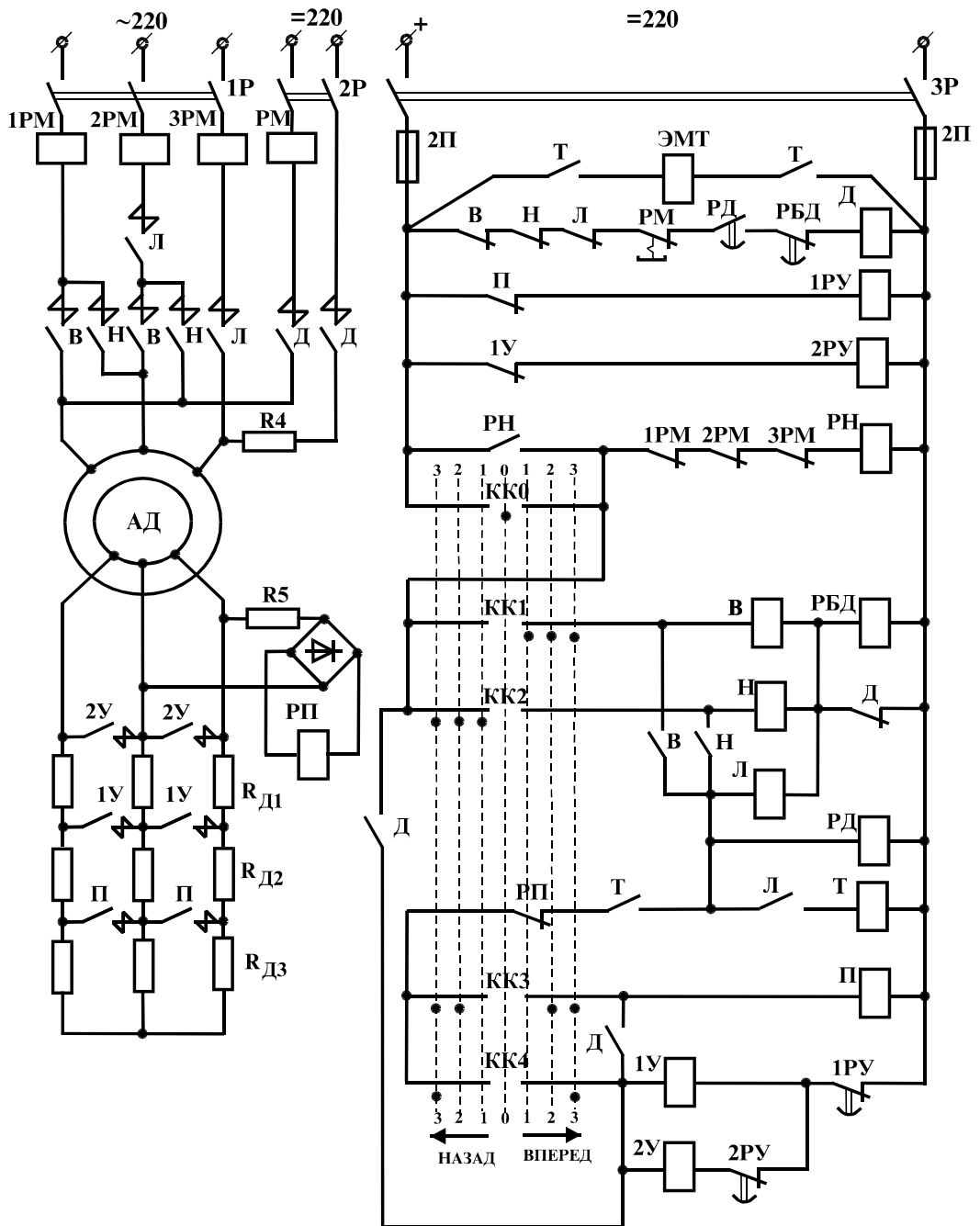


Рисунок 14. Електрична принципова схема релейного керування електроприводом пересування з АДФР

Момент двигуна змінюється від пускового  $M_1$  до моменту переключення  $M_2$ . Значення кутової швидкості, що відповідають цим моментам для кожної ділянки пуску і гальмування дорівнюють (см. рис. 8):

- 1:  $\omega_{max} = 0$ ;  $\omega_{min} = 40,507 \text{ рад/с}$  ;
- 2:  $\omega_{max} = 40,507 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_{min} = 54,71 \text{ рад/с}$  ;
- 3:  $\omega_{max} = 54,71 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_{min} = \omega = 61,96 \text{ рад/с}$  ;
- 4:  $\omega_{max} = 61,96 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_{min} = 0$  .

Розрахунок перехідних процесів пуску і гальмування двигуна здійснимо за допомогою ЕОМ і ПО Mathcad. Нижче приведена розрахункова таблиця режимів пуску і гальмування.

**Таблиця розрахункових значень перехідних процесів двигуна**

Ділянка	Кутові швидкості двигуна на ділянці, <i>рад/с</i>				Електромагнітний момент двигуна, <i>Н·м</i>			Динамічний момент, <i>Н·м</i>
	№	$\omega_{нач.i}$	$\omega_{кон.i}$	$\omega_{ср.i}$	$\Delta\omega_i$	$M_{нач.i}$	$M_{кон.i}$	$M_{ср.i}$
1	0	13,502	6,751	13,502	2571,52	2308,44	2439,97	1232,3
	13,502	27,004	20,253	13,502	2308,44	1902,23	2105,33	897,65
	27,004	40,507	33,755	13,502	1902,23	1328,45	1615,34	407,66
2	40,507	44,057	42,28	3,55	2550,95	2362,04	2456,5	1248,82
	44,057	47,607	45,83	3,55	2362,04	2102,33	2232,2	1024,51
	47,607	51,16	49,38	3,55	2102,33	1760,74	1931,54	723,86
	51,16	54,7	52,93	3,55	1760,74	1328,45	1544,6	336,9
3	54,7	55,8	55,26	1,098	2552,74	2396,67	2474,7	1267,03
	55,8	56,9	56,35	1,098	2396,67	2189,64	2293,16	1085,48
	56,9	58	57,45	1,098	2189,64	1925,24	2057,44	849,76
	58	59,1	58,55	1,098	1925,24	1599,61	1762,42	554,7
	59,1	61,96	59,65	1,098	1599,61	1209,2	1404,4	196,7
4	61,96	40,131	50,164	-20,066	-2552,06	-2357,7	-2454,88	-2454,88
	40,131	20,066	30,099	-20,066	-2357,7	-2088,5	-2223,1	-2223,1
	20,066	0	10,033	-20,066	-2088,5	-1732,3	-1910,4	-1910,4

**Продовження таблиці розрахункових значень перехідних процесів двигуна**

Інтервали часу, <i>с</i>	Полусума квадратів моментів, ( <i>Н·м</i> ) <sup>2</sup>	До перевірки Двигуна за нагрівом	Ділянка
$\Delta t_i$	$0,5 \cdot M_i^2$	$0,5 M_i^2 \cdot \Delta t_i$	№
0,268	5970783,85	1599190,17	1
0,322	4473667	1438341,08	
0,455	2691621,1	1224798,83	
$t_{ср1} = \sum_{i=1}^3 \Delta t_i$		$\approx 4262330,08$	
0,07	6043290,53	422144,94	2
0,079	4999516,93	392834,72	
0,094	3759997,76	354814,34	
0,127	2432485,26	309627,77	
$t_{ср2} = \sum_{i=4}^7 \Delta t_i$		$\approx 1479421,77$	
0,029	5986653,5	171938,5	3
0,033	4781355,2	158028,7	
0,042	3352079,03	139779,3	
0,063	1887491,1	119299,02	
0,176	685594,5	120828,8	
$t_{ср3} = \sum_{i=8}^{12} \Delta t_i$		$\approx 709874,27$	
0,333	6103138,6	2030442,9	4
0,368	5010915,8	1841814,1	
0,429	3700484,7	1586979,8	
$t_{ср4} = \sum_{i=13}^{15} \Delta t_i$		$\approx 5459236,7$	

**Примітка.** 4-та ділянка у вшеченаведеній таблиці відповідає інтервалу гальмування двигуна.

Інтервал часу сталого руху привода у прямому напрямку зі швидкістю  $\omega_c$  дорівнює:

$$t_{y.u} = t_1 - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i - t = 12 - 1,757 - 1,129 = 9,114 \text{ с}$$

Інтервал часу сталого руху привода у зворотному напрямку зі швидкістю  $\omega_c$  дорівнює:

$$t_{y.z} = t_2 - \sum_{i=4}^7 \Delta t_i - t = 14 - 1,757 - 1,129 = 11,114 \text{ с}$$

Графіки перехідних процесів кутової швидкості і моменту двигуна для режимів пуску і гальмування зображені на рисунках 15, 16, 17 и 18.

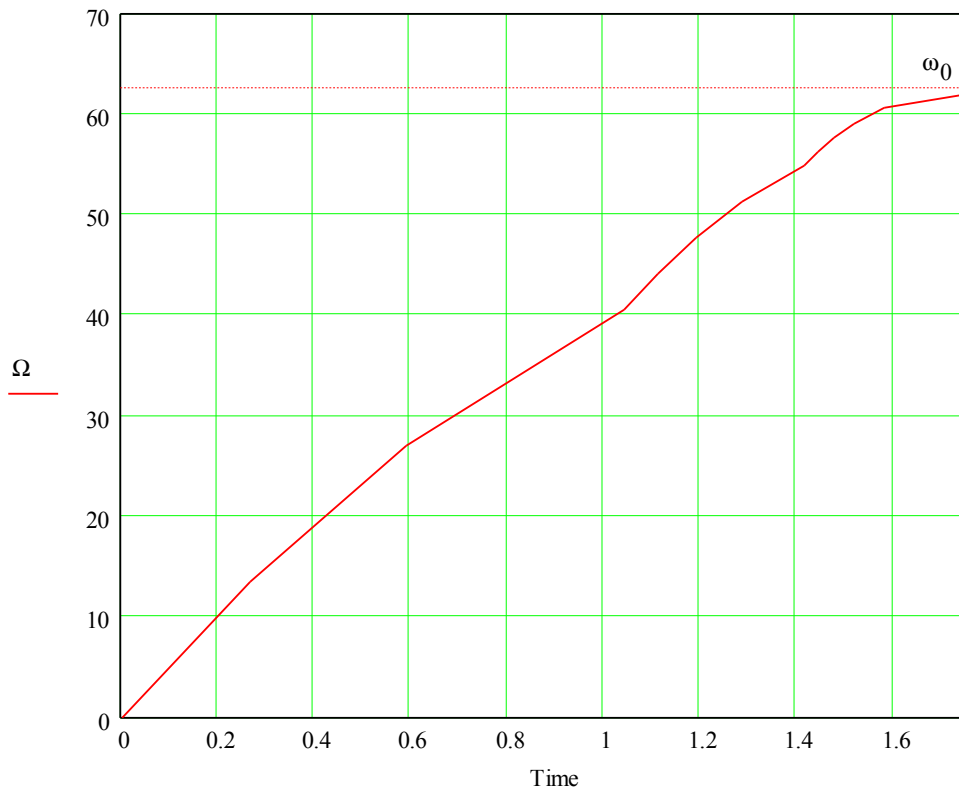


Рисунок 15. Перехідний процес кутової швидкості двигуна при пуску у дві ступіні.

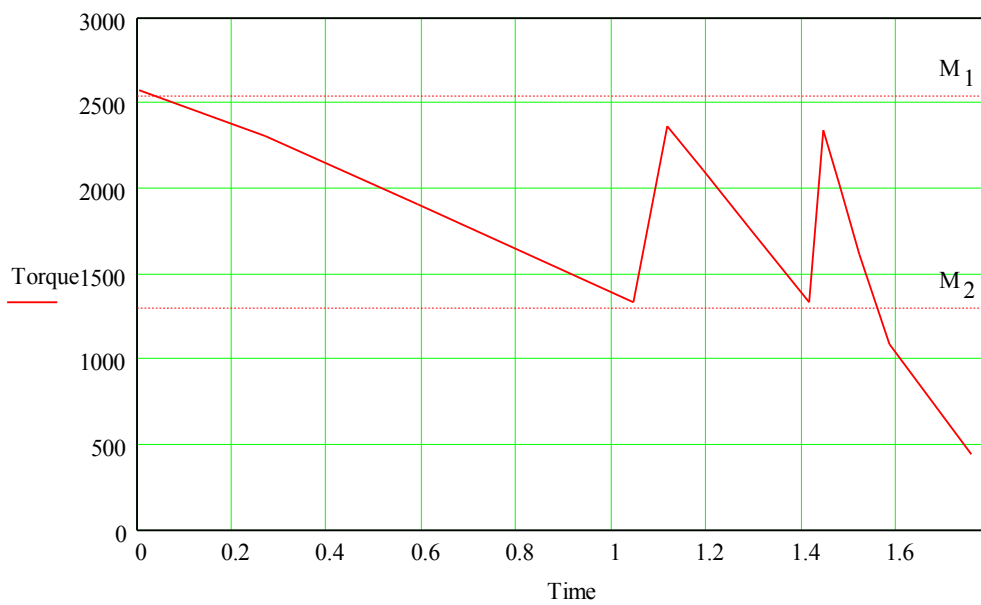


Рисунок 16. Перехідний процес моменту двигуна при пуску у дві ступіні.

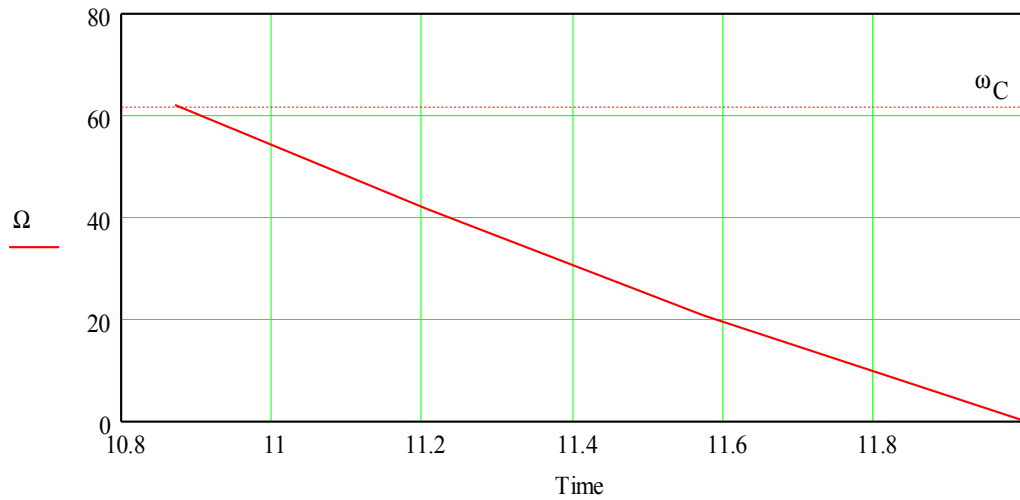


Рисунок 17. Перехідний процес кутової швидкості двигуна у режимі гальмування противключенням

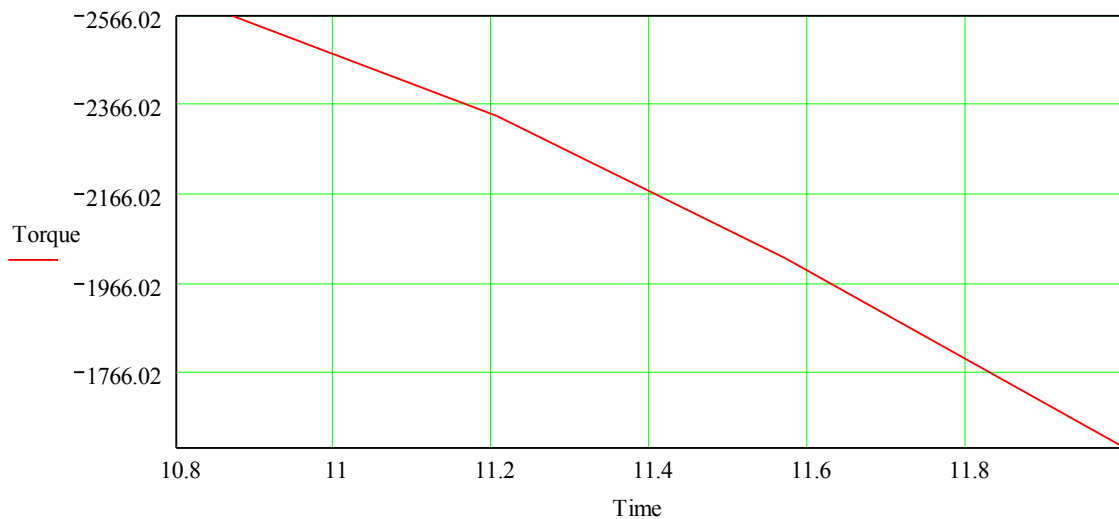


Рисунок 18. Перехідний процес момента двигуна у режимі гальмування противключенням

## 10. Розрахунок варіанта реалізації блоку додаткових резисторів в роторному колі

Вибір резисторів з каталогу виконується з урахуванням їх опору та робочого струму. Робочий продовжений струм резисторів розраховується з еквівалентного моменту:

$$I_p = I_{\text{дл}} \sqrt{\frac{M_E}{M_H}} = 140 \times \sqrt{\frac{778,25}{1118}} = 116,8$$

Теплова потужність у додаткових опорах ротора:

$$I_{\text{рл}}^2 \times (R_{\text{дл}} + R_{\text{оп}} + R_{\text{БМ}}) = 116,8^2 \times (0,151 + 0,055 + 0,237) = 6039,9$$

Фехралеві елементи мають більшу механічну міцність, не бояться перегріву до 850 °С (чавунні до 270 °С), мають невелику залежність опору від температури. Одна із особливостей – незмінність монтажною схеми (рис. 19).

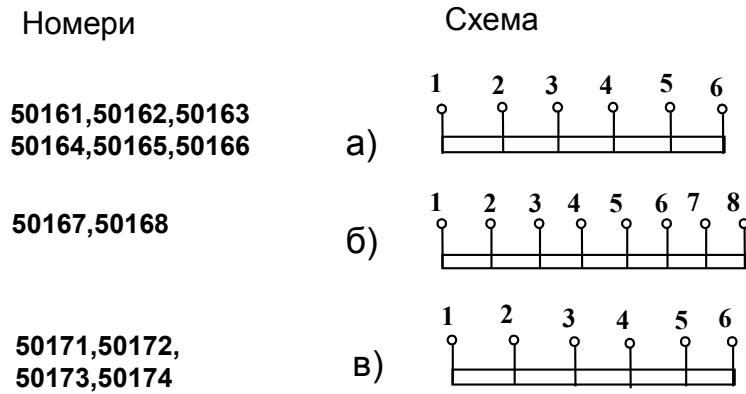


Рисунок 19. Схеми резисторних ящиків з фехралевими елементами

Таким чином, за викладені вище умови обираємо ящик з фехралевими елементами типу ЯС4-0,294, параметри якого зведені у таблицю:

Позначення	Струм		Опори секцій, Ом						Пост. Т, с
	А	р1-р2	р2-р3	р3-р4	р4-р5	р5-р6	р6-р7	р7-р8	
ЯС4-0,294	124	0,0575	0,06	0,06	0,0575	0,0587	-	-	220

Схема реалізації додаткових опорів фази ротора на базі ящиків ЯС4-0,294 зображена на рисунку 20.

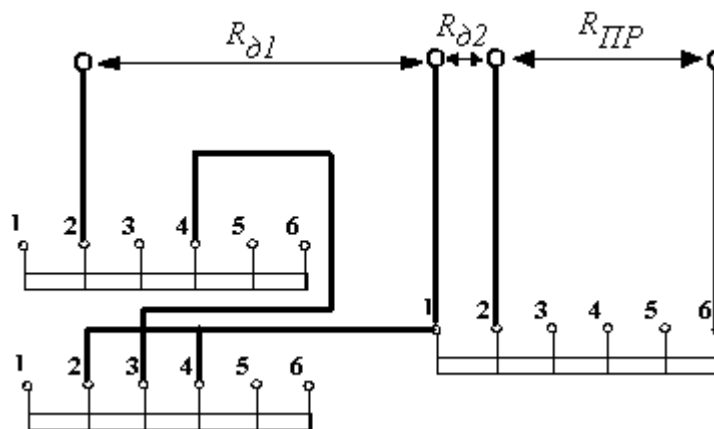


Рисунок 20. Схема з'єднань додаткових опорів фази ротора

## 11. Перевірка двигуна за нагрівом

Перевірку двигуна за нагрівом здійснимо методом еквівалентного моменту. Еквівалентний момент визначається згідно вираженню:

$$M_E = \sqrt{\frac{1}{t_{M1} + t_{M2}} \sum_{i=1}^n M_i^2 \Delta t_i} =$$

$$= \sqrt{\frac{4262330,08 + 1479421,77 + 709874,27 + 5459236,7 + 435,5^2 \times 9,114 + 435,5^2 \times 1,114}{12 + 14}} =$$

$$= 778,25 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де  $n$  – кількість інтервалів навантаження двигуна.

Еквівалентний момент при стандартній тривалості включення дорівнює:

$$M'_E = M_E \sqrt{\frac{PB_p}{PB}} = M_E \cdot \sqrt{\frac{PB_p}{PB}} = 1,$$

оскільки  $PB_p = PB$ .

Вочевидь обраний двигун проходить за нагрівом, оскільки еквівалентний розрахунковий момент його навантаження є меншим за номінальний у 1118 Нм.

## Висновки

Використана у роботі методика дозволяє ефективно розраховувати сталі та перехідні режими асинхронних двигунів з фазними роторами і регулюванням зміною опору роторного кола

З використанням ЕОМ можливо збільшити швидкість та точність розрахунків роторного кола двигуна і перехідних режимів його роботи. Обчислювальна машина та програмне забезпечення також дозволяє виконувати побудовання графічних залежностей кутової швидкості від моменту двигуна і з високою ефективністю проводити графо-аналітичний аналіз механічних характеристик для визначення величин пускових і гальмівного опорів, що зображено на відповідних рисунках.

Проведені розрахунки підтвердили придатність обраного попередньо асинхронного двигуна типу МТМ612-10 для побудовання електроприводу переміщення із заданою навантажувальною функцією.

Для здійснення пуску двигуна у дві ступені та режиму гальмування проти включенням необхідно використати три ящики типу ЯС4-0,294 з фехралевими опорними елементами на одну фазу роторного кола двигуна.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2. – Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л., «Энергия», 1973.
2. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. – М.: Энергия, 1977. – 432с., ил.
3. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494с., іл.
4. Расчет статических и динамических режимов электроприводов. Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Основы электропривода» для студентов специальностей 140205 и 140211 заочной формы обучения / сост. А. С. Чернышева. Владивосток, ДВГТУ, 2006.