

ЗМІСТ

ВСТУП	4
<i>Практична робота</i>	
Розрахунок механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження	5
<i>Практична робота</i>	
Розрахунок механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму послідовного збудження	19
<i>Практична робота</i>	
Розрахунок механічних характеристик і опорів пускових резисторів асинхронного електродвигуна з фазним ротором	36
<i>Практична робота</i>	
Розрахунок механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором	49
<i>Практична робота</i>	
Визначення часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» методом графо-аналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу	62
<i>Практична робота</i>	
Розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при регулюванні швидкості обертання частотою струму	76
<i>Практична робота</i>	
Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором для різних режимів роботи	98

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Основи електроприводу» є профільуючою навчальною дисципліною за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у закладах вищої освіти III - IV рівнів акредитації при підготовці фахівців ступеня вищої освіти «Бакалавр».

Методичні вказівки підготовлені у відповідності з навчальною програмою курсу «Основи електроприводу» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Навчальним планом передбачено проведення практичних занять за основними розділами курсу. Методичні вказівки знайомлять студентів з темами занять, метою, програмою занять, завданнями до самостійної підготовки і методикою рішення задач.

На практичному занятті студент повинен закріпити одержані теоретичні знання, самостійно вирішувати практичні інженерні задачі і набути практичних навичок з розрахунку електроприводів.

Одержавши графік виконання практичних робіт з дисципліни, студент самостійно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи теоретичного матеріалу.

Перед виконанням практичної роботи викладач перевіряє готовність студента за темою практичного заняття, використовуючи контрольні питання, які приводяться в практичній роботі. Лише після перевірки викладачем ступеня підготовки студента до заняття, студент може виконувати практичну роботу.

Для роботи студент отримує варіант індивідуального завдання і необхідну нормативно-довідкову літературу. Студент самостійно виконує розрахунки відповідно до теми практичного заняття.

Після виконання необхідних розрахунків студент складає звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів розрахунку.

В кінці заняття студент повинен представити викладачу результати індивідуальної роботи за темою практичного заняття, при необхідності внести необхідні виправлення та одержати бали від викладача за свою роботу.

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО (НЕЗАЛЕЖНОГО) ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму (ДПС) паралельного (незалежного) збудження з використанням каталогових даних, навчитися будувати графіки природної та штучних механічних характеристик, пускову діаграму ДПС паралельного (незалежного) збудження.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 45-62; 2, с. 11-27; 5, с. 48-57].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку механічних характеристик ДПС паралельного (незалежного) збудження з використанням каталогових даних.

1.3 Ознайомитися з методикою визначення опору пускових резисторів ДПС паралельного (незалежного) збудження.

1.4 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати механічні характеристики двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження.

2.1.1 Природну механічну характеристику.

2.1.2 Штучну механічну характеристику при $U_2 = kU_n$.

2.1.3 Штучну механічну характеристику при $R_p = kR_{я}$.

2.2 Розрахувати і побудувати пускову діаграму для ДПС паралельного (незалежного) збудження.

2.3 Визначити опір пускових резисторів.

3 Загальні відомості і рекомендації

Принципова схема вмикання двигуна постійного струму паралельного збудження наведена на рисунку 1.

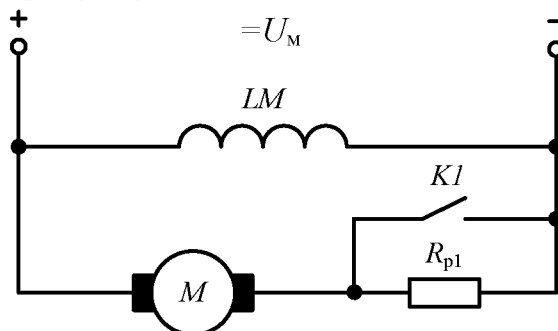


Рисунок 1 – Принципова електрична схема пуску ДПС паралельного збудження

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Тип електродвигуна	P_H , кВт	U_H , В	I_H , А	n_H , об./хв.	К-сть ступенів	$U_{я} = kU_H$	$R_p = kR_{я}$	$M_l = kM_H$
1	4ПБМ112МО4	1,4	220	7,6	2300	2	0,8	3	2,5
2	4ПБМ132МО4	3,75	220	19,3	2500	4	0,6	5	2
3	4ПБМ160МО4	2,12	220	11,6	775	3	0,8	7	2,1
4	4ПБМ112МО4	0,45	220	3,0	750	2	0,85	5	2,0
5	4ПБМ160МО4	4,75	220	24,4	1600	3	0,6	6	2,3
6	4ПБМ132МО4	1,12	220	6,7	710	2	0,8	5	2,2
7	4ПБМ112МО4	1,0	220	5,7	1550	2	0,7	2	2,4
8	4ПБМ112МО4	0,63	220	3,8	1060	2	0,9	6	2,2
9	4ПБМ112ЛО4	0,9	220	5,1	1060	2	0,5	7	2,3
10	4ПБМ132МО4	1,6	220	9,0	1030	3	0,9	3	2,0
11	4ПБМ112ЛО4	0,63	220	3,9	750	2	0,6	9	2,2
12	4ПБМ132МО4	2,5	220	13,3	1600	3	0,7	9	2,1
13	4ПБМ112ЛО4	1,85	220	9,8	2240	3	0,85	6	2,2
14	4ПБМ112ЛО4	1,32	220	7,3	1500	3	0,7	5	2,0
15	4ПБМ180МО4	7,1	220	35,6	1500	4	0,8	8	2,0
16	4ПБМ160ЛО4	5,8	220	29,2	1600	3	0,8	5	2,4
17	4ПБМ160МО4	6,5	220	32,7	2240	4	0,75	9	2,0
18	4ПБМ160ЛО4	2,8	220	14,9	750	3	0,7	7	2,2
19	4ПБМ180МО4	11,8	220	58,5	2720	4	0,8	6	2,1
20	4ПБМ132ЛО4	3,15	220	16,5	1450	3	0,8	5	2,2
21	4ПБМ132ЛО4	4,5	220	22,9	2300	4	0,5	4	2,0
22	4ПБМ132ЛО4	1,4	220	8,0	710	2	0,8	3	2,4
23	4ПБМ132ЛО4	2,0	220	10,7	1090	3	0,8	8	2,1
24	4ПБМ160ЛО4	3,75	220	19,5	1030	3	0,7	4	2,2
25	4ПБМ180ЛО4	4,12	220	21,2	750	3	0,9	3	2,3

Усталені (статичні) режими двигуна постійного струму (ДПС) незалежного (паралельного) збудження описуються відомими з курсу електричних машин рівняннями

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R; \quad (1)$$

$$E = k\Phi \cdot \omega; \quad (2)$$

$$M = k\Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (3)$$

де U – напруга, прикладена до якірного кола, В;
 $I_{\text{я}} \cdot R$ – спад напруги в якірному колі, В;
 $I_{\text{я}}$ – струм у колі якоря, А;
 $R = R_{\text{дв}} + R_{\text{д}}$ – сумарний опір якірного кола двигуна, який складається з внутрішнього опору двигуна $R_{\text{дв}}$ та додаткового опору $R_{\text{д}}$, Ом.
Внутрішній опір двигуна складається з опору обмотки якоря $r_{\text{я}}$, обмотки додаткових полюсів $r_{\text{дп}}$, компенсаційної обмотки $r_{\text{к}}$ і щіткового контакту $r_{\text{щ}}$, тобто $R_{\text{дв}} = r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{к}} + r_{\text{щ}}$;
 E – ЕРС якоря (залежить від параметрів машини, магнітного потоку Φ і кутової швидкості ω), В;
 $k = pN / (2\pi a)$ – конструктивна стала двигуна;
 p – число пар полюсів;
 N – кількість активних провідників обмотки якоря;
 a – кількість паралельних витків обмотки якоря.
В практичних розрахунках потрібно знати номінальний момент на валу $M_{\text{н}}$, (Н·м)

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{н}}}. \quad (4)$$

Номінальна кутова швидкість двигуна $\omega_{\text{н}}$, (рад/с), визначається

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} \approx 0,105 \cdot n_{\text{н}}. \quad (5)$$

Рівняння статичної електромеханічної характеристики двигуна постійного струму з будь-ким збудженням має вигляд

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R}{k\Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi}. \quad (6)$$

Електромеханічною характеристикою електродвигуна називають

залежність його кутової швидкості від струму якоря $\omega = f(I_{\text{я}})$.

Рівняння *статичної механічної характеристики* ДПС з будь-яким збудженням має вигляд

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot R}{(k\Phi)^2} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi)^2}. \quad (7)$$

Механічною характеристикою електродвигуна обертального руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M)$.

З урахуванням виразу $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{\text{н}}}$ – швидкість ідеального холостого ходу,

яка має місце при $I_{\text{я}} = 0$ для електромеханічної характеристики і $M = 0$ для механічної характеристики, рівняння електромеханічної характеристики ДПС паралельного (незалежного) збудження має вигляд

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_{\text{н}}} = \omega_0 - \frac{I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_{\text{н}}}, \quad (8)$$

а рівняння механічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{\text{н}}} - \frac{M \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi_{\text{н}})^2} = \omega_0 - \frac{M \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi_{\text{н}})^2}. \quad (9)$$

Коефіцієнт $k\Phi_{\text{н}}$ визначається з рівняння (8), записаного для точки номінального режиму роботи двигуна

$$k\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}. \quad (10)$$

Механічні характеристики можуть бути природними і штучними. **Природною** механічною характеристикою електродвигуна називають залежність швидкості обертання двигуна від створюваного ним моменту при номінальних параметрах мережі живлення (номінальних значеннях напруги $U_{\text{н}}$ і частоти), номінальному магнітному потоці $\Phi_{\text{н}}$ і при відсутності додаткових опорів у колі якоря (ротора, статора) $R_{\text{д}} = 0$.

Якщо природна механічна характеристика не задовольняє тих або інших вимог виробничого механізму, використовують **штучні** механічні характеристики – залежність кутової швидкості двигуна від його моменту, але при неномінальних параметрах.

Кожний двигун має по одній природній електромеханічній і механічній характеристиці та безліч штучних характеристик.

Природна і штучні механічні характеристики ДПС паралельного (незалежного) збудження в загальному вигляді наведені на рисунку 2.

Оскільки природна механічна характеристика (рисунок 2) зображується похилою прямою лінією, то її можна побудувати за двома точками, координати яких відповідають наступним значенням:

перша точка $\omega = \omega_0$, $M = 0$;

друга точка $\omega = \omega_H$, $M = M_H$.

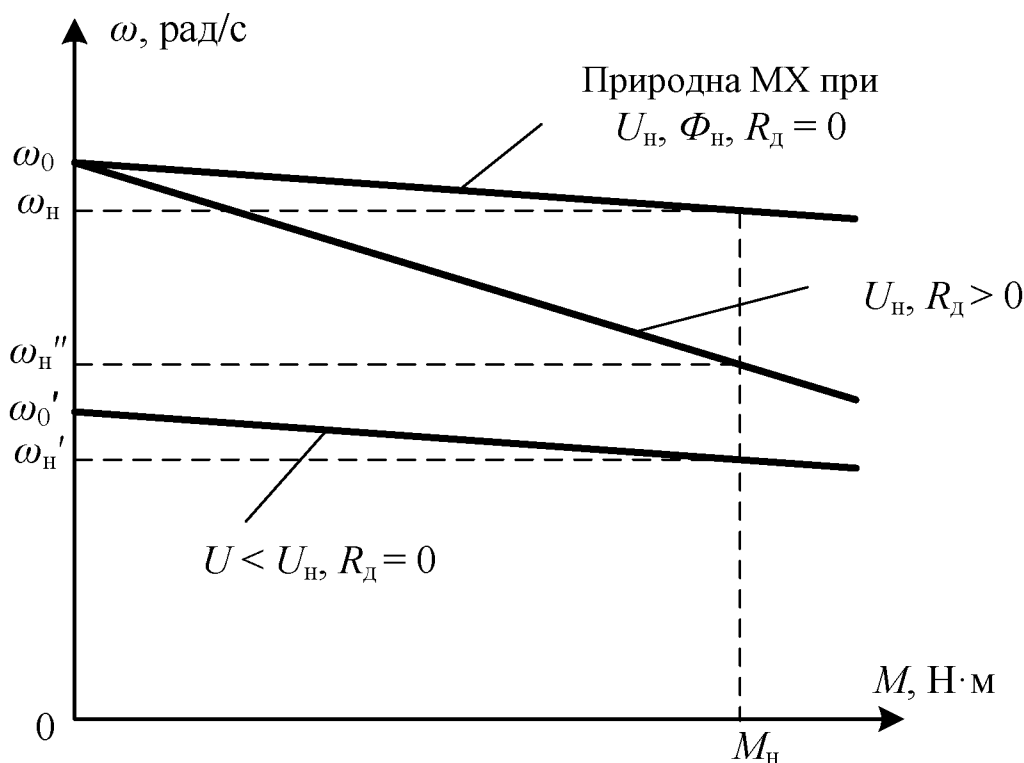


Рисунок 2 – Природна та штучні механічні характеристики ДПС паралельного (незалежного) збудження

Якщо внутрішній опір кола якоря електродвигуна (ЕД) невідомий і заводські дані відсутні, то його величину можна приблизно визначити, припускаючи, що половина номінальних втрат потужності ΔP_H – це втрати в міді обмотки, тобто постійні та змінні втрати при номінальному навантаженні однакові

$$0,5 \cdot \Delta P_H = I_{яH}^2 \cdot R_{я};$$

$$R_{дв} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_{яH}}, \quad (11)$$

де η_H – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна.

Пуск ДПС може бути прямим або непрямым. Прямий пуск застосовують

тільки для електродвигунів, які мають порівняно великий внутрішній опір кола якоря і виконується умова

$$I_{\text{пр п}} \leq I_{\text{я доп}} = k \cdot I_{\text{ян}},$$

де $k = 2 \dots 3$ – кратність допустимого струму якоря.

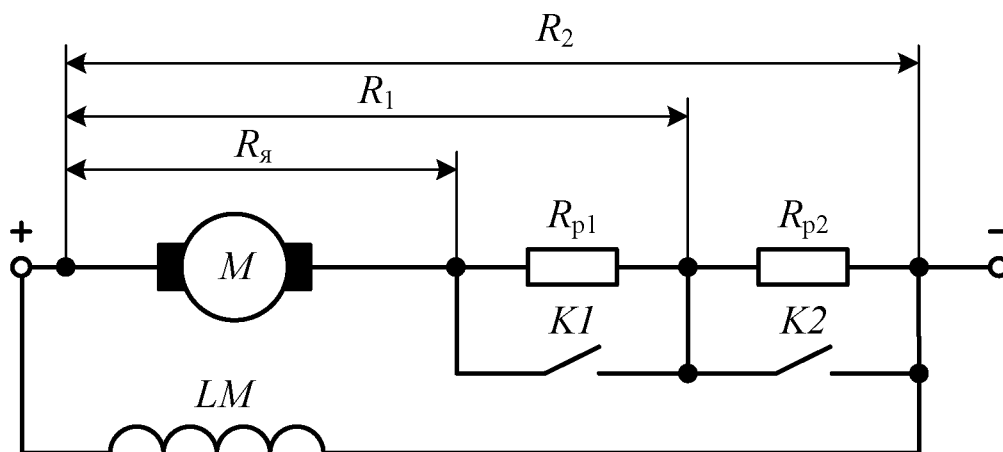
Для ЕД потужністю понад 0,5 кВт прямий пуск не рекомендується, оскільки при вмиканні безпосередньо на повну напругу електромережі через значний пусковий струм на колекторі ЕД може з'явитися сильне іскріння або навіть коловий вогонь. При цьому на валу ЕД виникає значний динамічний момент, на який можуть бути не розраховані передавальний пристрій і робоча машина, в живильній мережі відбувається значне спадання напруги, ускладнюється робота захисної і вимірювальної апаратури.

Непрямий пуск здійснюється шляхом введення в коло якоря опору пускового реостата або зміни напруги від значення, при якому в колі якоря проходить пусковий струм (не більше допустимого), з подальшим підвищенням його до номінального значення. При одноступінчастому пуску (рис. 1) опір пускового реостата визначають за формулою

$$R_p = \frac{U_n}{I_{\text{я доп}}} - R_{\text{дв}}. \quad (12)$$

Реостатний пуск двигуна можна здійснювати при плавному зменшенні опору резистора і постійних за величиною значеннях пускового моменту і пускового струму або при ступінчастому зменшенні опору і коливаннях пускового моменту і пускового струму в межах від максимальних до мінімальних значень, допустимих за умовами роботи електроприводу.

На практиці найчастіше застосовують ступінчастий пуск. Кількість пускових ступенів, а також межі коливання струмів і моментів при пуску залежать від вимог технологічного процесу. Зазвичай пусковий реостат має не більше 5 ступенів. На рисунку 3 зображена принципова схема реостатного пуску ДПС паралельного збудження в дві ступені.



**Рисунок 3 – Схема вмикання пускових резисторів
ДПС паралельного збудження**

Пусковий реостат має дві секції опорів R_{p1} і R_{p2} . Величину пускового струму I_1 приймають за умовами комутації в межах

$$I_1 = (2 \dots 2,5) \cdot I_H.$$

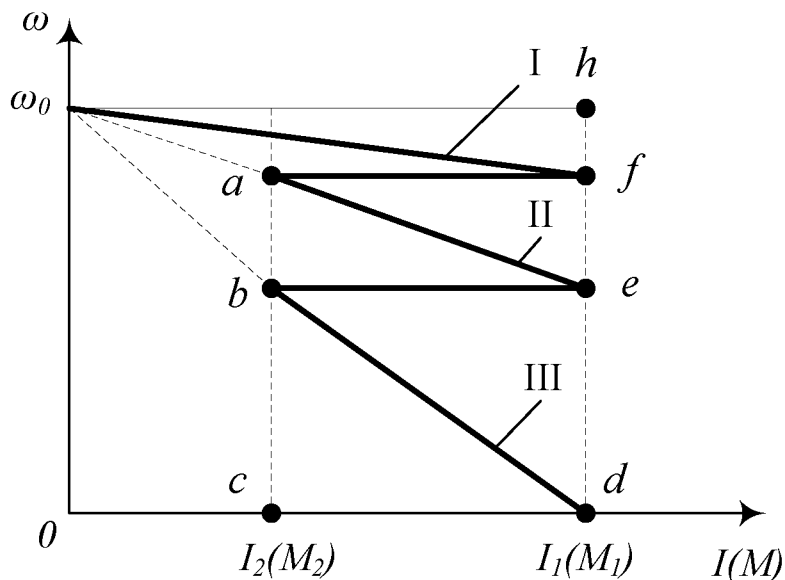
Струм перемикання обов'язково повинен задовольняти умові $I_2 > I_{я0}$. Мінімальне його значення приймають залежно від навантаження на валу ЕД в межах

$$I_2 = (1,1 \dots 1,2) \cdot I_{я0},$$

де $I_{я0}$ – струм якоря при моменті статичних опорів M_c .

Чим менше різниця між I_1 і I_2 , тим більшою буде кількість пускових ступенів. Величини опорів пускових резисторів ДПС паралельного збудження можна визначити графоаналітичним методом.

Пускова діаграма ДПС паралельного збудження з пуском в дві ступені представлена на рисунку 4.



**Рисунок 4 – Пускова діаграма ДПС паралельного збудження
з пуском в 2 ступені**

4 Приклад розрахунку

Для ДПС паралельного збудження типу 4ПБМ112МО4 розрахувати і побудувати природну і штучні механічні характеристики при $U_2 = 0,8U_H$ та $R_p = 3R_{я}$, пускову діаграму електродвигуна та визначити опір резисторів пускового реостату. Пуск двигуна постійного струму повинен бути виконаний в 3 ступені, $M_1 = 2M_H$.

Каталогові дані ДПС:

$$P_H = 1,0 \text{ кВт}; \quad U_H = 220 \text{ В}; \quad I_{яH} = 5,7 \text{ А}; \quad n_H = 1550 \text{ об/хв.}$$

Принципова схема пуску ДПС паралельного збудження в три ступені представлена на рисунку 5.

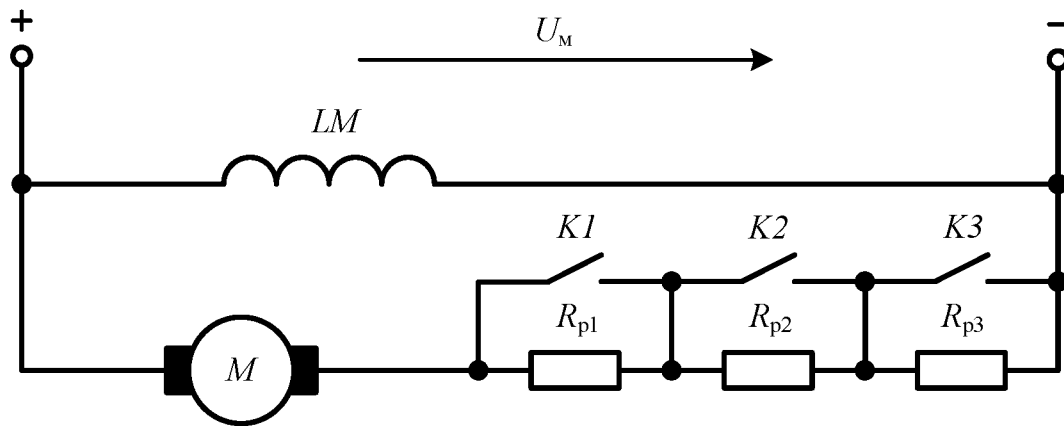


Рисунок 5 – Принципова електрична схема пуску ДПС в три ступені

1 Розрахуємо та побудуємо природну механічну характеристику ДПС паралельного збудження.

Природна механічна характеристика будується по двох точках:

перша точка $\omega = \omega_0$, $M = 0$;

друга точка $\omega = \omega_n$, $M = M_n$.

Визначаємо номінальну кутову швидкість

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30},$$

де n_n – номінальна частота обертання, об/хв.

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1550}{30} = 162,2 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо номінальний момент на валу

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_n – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

$$M_n = \frac{1,0 \cdot 10^3}{162,2} = 6,16 \text{ Н·м.}$$

Визначаємо синхронну кутову швидкість

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}},$$

де k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей двигуна, 1/рад;

$\Phi_{\text{н}}$ – номінальний магнітний потік, Вб.

Визначаємо значення коефіцієнта магнітного потоку

$$k\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

Визначаємо опір обмотки якоря

$$R_{\text{дв}} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}},$$

де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна, в.о.

Визначаємо номінальний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{ян}}};$$

$$\eta_{\text{н}} = \frac{1000}{220 \cdot 5,7} = 0,79;$$

$$R_{\text{дв}} \approx 0,5 \cdot (1 - 0,79) \cdot \frac{220}{5,7} = 4,05 \text{ Ом};$$

$$k\Phi_{\text{н}} = \frac{220 - 5,7 \cdot 4,05}{162,2} = 1,21 \text{ Вб/рад};$$

$$\omega_0 = \frac{220}{1,21} = 181,8 \text{ рад/с}.$$

За координатами розрахованих точок будуємо природну механічну характеристику ДПС паралельного збудження (рисунок 6).

2. Розрахуємо та побудуємо штучні механічні характеристики:

а) при зниженій напрузі $U_2 = 0,8U_{\text{н}}$.

Визначаємо кутову швидкість ідеального холостого ходу при $U_2 = 0,8U_{\text{н}}$

$$\omega_{01} = \frac{0,8U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}};$$

$$\omega_{01} = \frac{0,8 \cdot 220}{1,21} = 145,5 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо кутову швидкість при $M_{\text{н}}$ і $U_2 = 0,8U_{\text{н}}$

$$\omega_{\text{н1}} = \frac{0,8U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}} - \frac{M_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{н}})^2} = \omega_{01} - \frac{M_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{н}})^2};$$

$$\omega_{\text{н1}} = 145,5 - \frac{6,16 \cdot 4,05}{1,21^2} = 128,5 \text{ рад/с.}$$

За координатами розрахованих точок будуємо штучну механічну характеристику ДПС паралельного збудження при $U_2 = 0,8U_{\text{н}}$ (рис. 6).

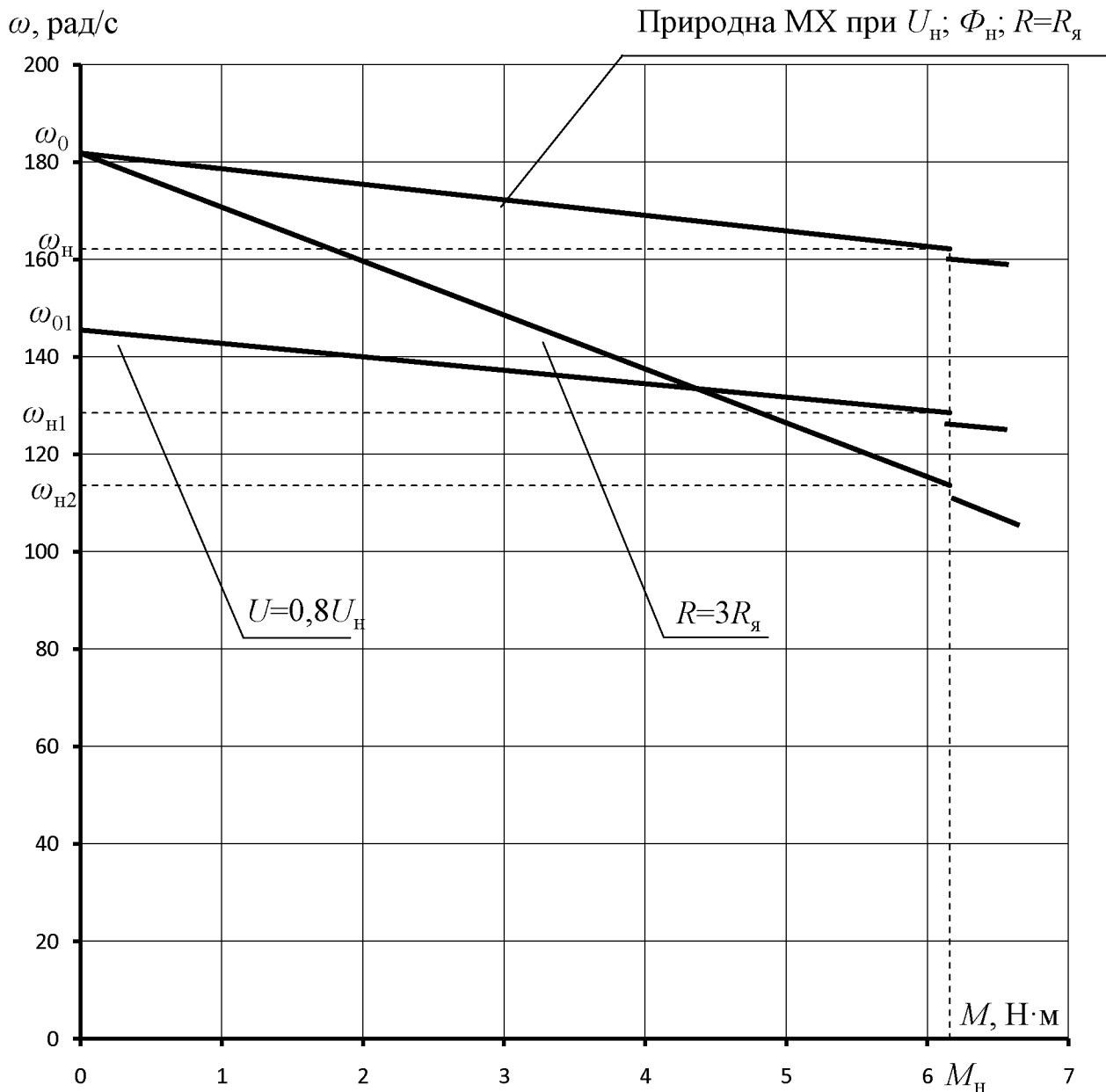


Рисунок 6 – Природна та штучні механічні характеристики
двигуна постійного струму паралельного збудження

б) при введенні в коло обмотки якоря пускового реостата, опір якого дорівнює $R_p = 3R_{\gamma}$.

Визначаємо кутову швидкість при M_H і $R_p = 3R_{\gamma}$ за формулою

$$\omega_{H2} = \omega_0 - \frac{M_H \cdot (R_{\gamma_{дв}} + R_p)}{(k\Phi_H)^2};$$

Згідно завдання величина опору пускового реостата $R_p = 3R_{\gamma}$. Отже

$$\omega_{\text{н2}} = \omega_0 - \frac{M_{\text{н}} \cdot (R_{\text{ядв}} + 3R_{\text{я}})}{(k\Phi_{\text{н}})^2} = \omega_0 - \frac{M_{\text{н}} \cdot 4R_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{н}})^2};$$

$$\omega_{\text{н2}} = 181,8 - \frac{6,16 \cdot 4 \cdot 4,05}{1,21^2} = 113,6 \text{ рад/с.}$$

За координатами розрахованих точок будуюмо штучну механічну характеристику ДПС паралельного збудження при введенні в коло обмотки якоря пускового реостата, опір якого дорівнює $R_{\text{р}} = 3R_{\text{я}}$ (рис. 6).

Для побудови пускової діаграми двигуна постійного струму паралельного збудження за розрахунковими даними будуюмо природну механічну характеристику $\omega = f(M)$ (рисунк 7) і відмічаємо на ній точки допустимих моментів при перемиканні з однієї ступені резистора на іншу M_1 і M_2 .

При цьому, згідно завдання $M_1 = 2M_{\text{н}} = 2 \cdot 6,16 = 12,32 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Момент M_2 знаходиться в межах $M_2 = (1,1 \dots 1,2) \cdot M_{\text{н}}$ і дорівнює

$$M_2 = 1,2 \cdot 6,16 = 7,39 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Проведемо через точки M_1 і M_2 пунктиром дві паралельні лінії до перетину з характеристикою ідеального холостого ходу в точках a і e .

Для розрахунку опорів пускових резисторів визначаємо масштаб опору

$$m_R = \frac{R_{\text{я}}}{l_{ab}};$$

$$l_{ab} = 22 \text{ мм};$$

$$m_R = \frac{4,05}{22} = 0,18 \text{ Ом/мм}.$$

З'єднуємо точки ω_0 і n та отримуємо точку f . Потім через точку f проводимо лінію, паралельну осі абсцис, до точки d на лінії na . Аналогічно будуюмо лінії hc і kb .

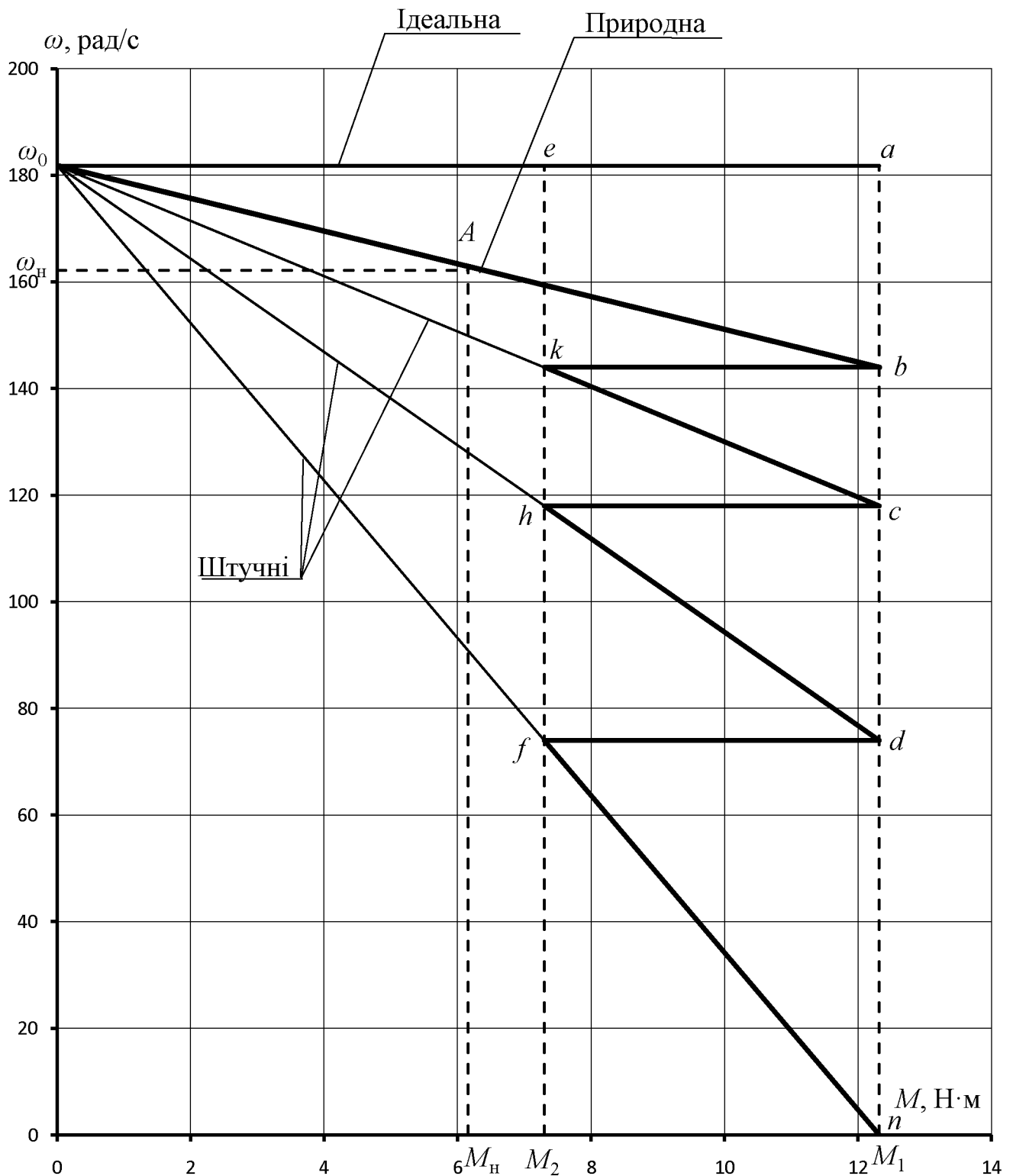


Рисунок 7 – Пускова діаграма ДПС паралельного збудження з пуском в три ступені

Побудова пускової діаграми вважається успішною, якщо остання горизонтальна лінія проходить через точку b . Якщо це не відбувається, то побудову необхідно повторити, змінивши значення моменту M_2 .

Визначаємо опір резисторів пускового реостату

$$R_{p1} = m_R \cdot I_{nd};$$

$$R_{p2} = m_R \cdot I_{dc};$$

$$R_{p3} = m_R \cdot I_{cb};$$

$$R_{p1} = 0,18 \cdot 71 = 12,78 \text{ Ом};$$

$$R_{p2} = 0,18 \cdot 46 = 8,28 \text{ Ом};$$

$$R_{p3} = 0,18 \cdot 25 = 4,5 \text{ Ом}.$$

Визначаємо загальний опір пускового реостату

$$R_p = \sum R_{pn};$$

$$R_p = 12,78 + 8,28 + 4,5 = 25,56 \text{ Ом}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

1 Варіант індивідуального завдання.

2 Розрахункові формули.

3 Принципову електричну схему пуску ДПС паралельного збудження з кількістю ступенів пуску згідно індивідуального завдання.

4 Природну механічну характеристику ДПС та штучні механічні характеристики, побудовані при різних умовах.

5 Пускову діаграму ДПС паралельного збудження.

6 Розрахункові дані опорів пускових резисторів.

7 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

1 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками двигуна постійного струму (ДПС)?

2 Що називається природною та штучною характеристиками ДПС?

3 Запишіть рівняння електромеханічної та механічної характеристик ДПС незалежного (паралельного) збудження та проаналізуйте їх.

4 Наведіть принципову електричну схему вмикання двигуна постійного струму паралельного збудження. З яких опорів складаються внутрішній опір двигуна і сумарний опір його якорного кола?

5 Від яких величин залежить електрорушійна сила якоря E і

електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ двигуна постійного струму незалежного (паралельного) збудження?

6 Як технічні дані ДПС наводяться в його паспортних даних?

7 Як розрахувати і побудувати природні механічну та електромеханічну характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження за паспортними даними?

8 Як визначити кутову швидкість ідеального холостого ходу ДПС?

9 Як приблизно визначити величину опору внутрішнього кола якоря ДПС паралельного (незалежного) збудження за каталоговими даними?

10 Як за каталоговими даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?

11 Як за каталоговими даними визначити номінальний момент двигуна постійного струму (на валу) у двигунному режимі роботи?

12 Як визначити струм якоря двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження у двигунному режимі роботи?

13 Як змінюється кутова швидкість при зміні величини магнітного потоку, опору в колі якоря, напруги, що підводиться?

14 З якою метою при запуску ДПС в коло якоря вводять пусковий резистор?

15 В яких межах змінюються момент і струм ДПС паралельного збудження при його пуску?

16 Який порядок побудови реостатних характеристик для розрахунку пускових резисторів?

17 Як впливає зміна величини додаткового опору в колі якоря на вид механічної і електромеханічної характеристик ДПС паралельного збудження?

18 Як впливає зміна величини напруги на якорі на вид механічної і електромеханічної характеристик ДПС паралельного збудження?

19 Як впливає зміна величини магнітного потоку на вид механічної і електромеханічної характеристик ДПС паралельного збудження?

20 Який вигляд мають штучні механічні та електромеханічні характеристики ДПС паралельного збудження при зміні опору якорного кола?

21 Який вигляд мають штучні механічні та електромеханічні характеристики ДПС паралельного збудження при зміні напруги?

22 Який вигляд мають штучні механічні та електромеханічні характеристики ДПС паралельного збудження при зміні магнітного потоку?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму (ДПС) послідовного збудження з використанням каталогових даних і універсальних характеристик, навчитися будувати графіки природної та штучних механічних характеристик, пускову діаграму ДПС послідовного збудження.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 62-71; 2, с. 27-36; 5, с. 65-70].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку механічних та електромеханічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) з використанням каталогових даних і універсальних характеристик $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$.

1.3 Ознайомитися з методикою визначення опору пускових резисторів ДПС послідовного збудження.

1.4 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати природну механічну характеристику двигуна постійного струму послідовного збудження $\omega = f(M)$.

2.2 Визначити значення опорів додаткових резисторів в колі якоря для зниження швидкості обертання електродвигуна. Для знайдених значень опорів резисторів розрахувати і побудувати реостатні механічні характеристики $\omega_1 = f(M)$, $\omega_2 = f(M)$.

2.3 Побудувати пускову діаграму ДПС послідовного збудження та розрахувати значення опорів пускових резисторів.

3 Загальні відомості і рекомендації

Схема вмикання двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) (рисунк 1) відрізняється від схеми вмикання ДПС паралельного збудження тим, що обмотка збудження ввімкнена послідовно з обмоткою якоря. Тому його магнітний потік Φ залежить від сили струму в якірному колі, тобто змінюється зі зміною навантаження. Залежність між струмом збудження і магнітним потоком має нелінійний характер і не має точного аналітичного виразу, тому не можна одержати аналітичного виразу механічної характеристики ДПС послідовного збудження.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Тип електродвигуна	n_1 , об./хв.	n_2 , об./хв.	$P_{\text{н}}$, кВт	$U_{\text{н}}$, В	$I_{\text{н}}$, А	$n_{\text{н}}$, об./хв.	Кількість ступенів
1	4ПБМ160МО4	800	400	3,0	220	15,8	1060	2
2	4ПНМ132МО4	700	500	2,5	220	14,3	1000	2
3	4ПБМ160ЛО4	1100	600	5,8	220	29,2	1600	2
4	4ПБМ180ЛО4	1000	700	8,5	220	42,3	1450	2
5	4ПБМ180МО4	1500	700	10,0	220	49,6	2180	3
6	4ПНМ180ЛО4	900	500	18,5	220	94,7	1400	3
7	4ПНМ180МО4	1300	500	25,0	220	131,7	2240	2
8	4ПБМ160ЛО4	600	400	2,8	220	14,9	750	2
9	4ПБМ180МО4	600	300	5,0	220	25,5	1030	2
10	4ПНМ160ЛО4	700	400	6,3	220	32,6	1060	2
11	4ПНМ160ЛО4	1400	800	16,0	220	81,4	2000	2
12	4ПБМ180ЛО4	500	300	4,12	220	21,2	750	2
13	4ПНМ180МО4	1000	700	15,0	220	76,6	1500	2
14	4ПНМ160МО4	1500	800	13,0	220	67,5	2120	2
15	4ПНМ180ЛО4	350	180	7,1	220	37,5	750	3
16	4ПНМ160МО4	1100	800	7,5	220	39,9	1500	3
17	4ПНМ180МО4	500	300	5,6	220	30,0	710	3
18	4ПНМ132ЛО4	700	400	3,15	220	18,4	1000	2
19	4ПНМ132ЛО4	1300	600	8,5	220	44,5	2240	2
20	4ПБМ160ЛО4	1350	650	8,0	220	39,7	2180	3
21	4ПБМ180МО4	1100	700	7,1	220	35,6	1500	3
22	4ПБМ160ЛО4	1700	800	9,5	220	46,9	2650	3
23	4ПНМ132МО4	900	500	4,0	220	21,5	1500	2
24	4ПНМ180МО4	800	450	8,0	220	41,1	1120	3
25	4ПНМ180ЛО4	700	400	11,0	220	57,2	1000	3

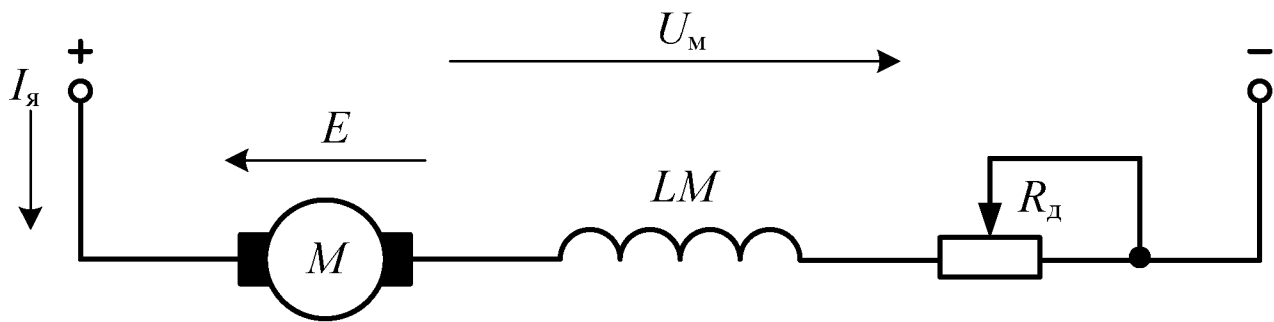


Рисунок 1 – Схема вмикання ДПС послідовного збудження

Для електродвигуна послідовного збудження рівняння електромеханічної характеристики, як і для двигуна незалежного збудження, має вигляд

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R}{k\Phi}, \quad (1)$$

де $R = R_{\text{дв}} + R_{\text{д}}$ – сумарний опір якірного кола двигуна, який складається з внутрішнього опору двигуна $R_{\text{дв}}$ та зовнішнього додаткового опору $R_{\text{д}}$, Ом.

До внутрішнього опору двигуна $R_{\text{дв}}$ входять опори обмотки якоря $r_{\text{я}}$, обмотки додаткових полюсів $r_{\text{дп}}$, обмотки збудження $r_{\text{з}}$ та щіткового контакту $r_{\text{щ}}$, тобто $R_{\text{дв}} = r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{з}} + r_{\text{щ}}$.

Побудувати дійсні природні електромеханічну і механічну характеристики ДПС ПЗ при практичних розрахунках можна за допомогою наведених в каталогах універсальних характеристик $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$, які у відносних одиницях (рисунок 2) виражають залежність швидкості обертання і моменту на валу двигуна від струму якоря при номінальній напрузі і відсутності зовнішніх додаткових опорів у якірному колі. Універсальні характеристики визначають експериментально, тому вони враховують насичення магнітного кола і вплив реакції якоря двигуна.

За універсальними характеристиками (рис. 2) і номінальними значеннями $I_{\text{н}}$, $M_{\text{н}}$, $\omega_{\text{н}}$ складають розрахункову таблицю 2 і за її даними будують природні електромеханічну і механічну характеристики двигуна. Спочатку за універсальними характеристиками заповнюють три перші рядки розрахункової таблиці 2, а потім визначають координати природних електромеханічної і механічної характеристик.

У перший рядок записують ряд довільних значень струмів і за універсальними характеристиками $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$ знаходять відповідні значення M_1^* , M_2^* , ..., M_i^* та швидкості ω_1^* , ω_2^* , ..., ω_i^* і записують їх відповідно у другий і третій рядки таблиці 2. Рядки 4-6

заповнюють даними в іменованих одиницях, знаходячи їх за рівняннями

$$M_i = M_H \cdot M^*; \quad \omega_i = \omega_H \cdot \omega^*.$$

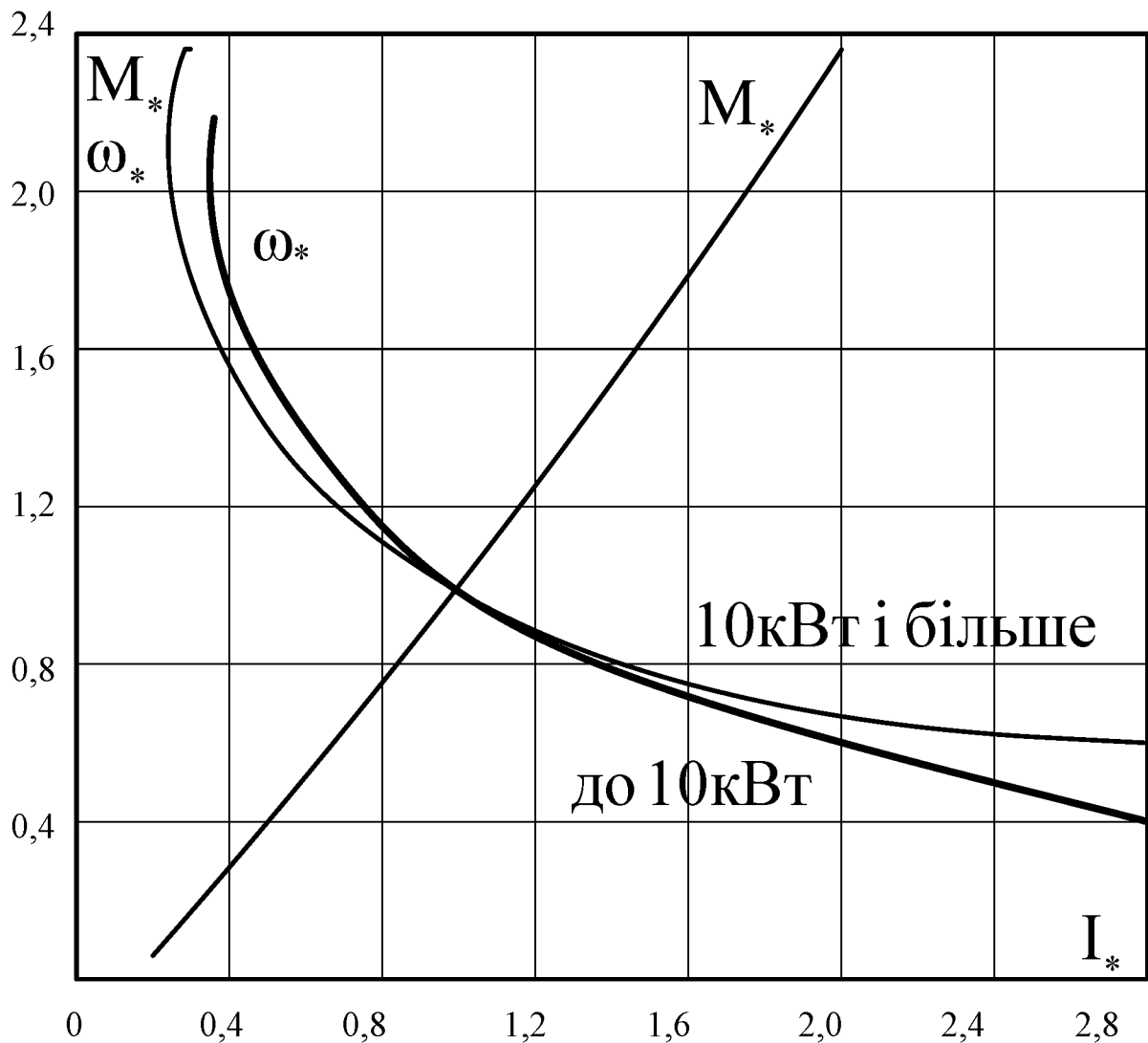


Рисунок 2 – Залежність моменту і кутової швидкості від струму якоря ДПС послідовного збудження (у відносних одиницях)

Таблиця 2 – Розрахункові значення для побудови природної механічної і електромеханічної характеристик ДПС послідовного збудження

I^* , в.о.	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
M^* , в.о.	0,35	0,55	0,78	1,0	1,3	1,5	1,75	2,1	2,3
ω^* , в.о.	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,85	0,8	0,75	0,70
I , А									
M , Н·м									
ω , рад/с									

За даними розрахункової таблиці 2 будують природну механічну характеристику ДПС ПЗ (рисунок 3).

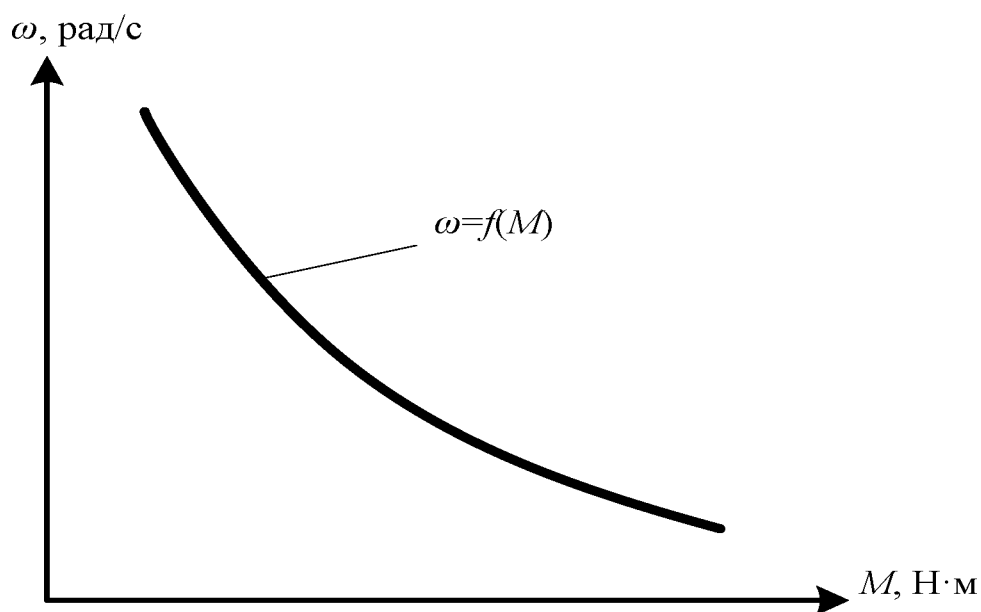


Рисунок 3 – Природна механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження

Рівняння штучної реостатної електромеханічної характеристики має вигляд

$$\omega_{\text{шт}} = \omega_{\text{пр}} \cdot \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{U_{\text{н}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{дв}}}. \quad (2)$$

Потрібні для розрахунку значення $R_{\text{дв}}$ знаходять у каталогах, експериментально або за наближеною формулою

$$R_{\text{дв}} \approx 0,75 \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}} \approx 0,75 \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \cdot R_{\text{н}}, \quad (3)$$

Коли відомі координати хоча б однієї точки штучної електромеханічної характеристики (ω_i, I_i) , то для визначення додаткового опору розв'язують рівняння (2) відносно $R_{\text{д}}$ і для струму I_i на природній характеристиці знаходять відповідну швидкість

$$R_{\text{д}} = \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_{\text{н}}}\right) \cdot (R_{\text{н}} - R_{\text{дв}}). \quad (4)$$

Із збільшенням опору швидкість двигуна при тому самому моменті зменшується і характеристика зміщується вниз (рисунок 4). Жорсткість характеристики зменшується з ростом додаткового опору в якорному колі.

Особливістю механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження є неможливість отримання режиму ідеального холостого ходу. При навантаженні нижче 15-20 % від номінального, робота двигуна практично недопустима через надмірне збільшення швидкості якоря.

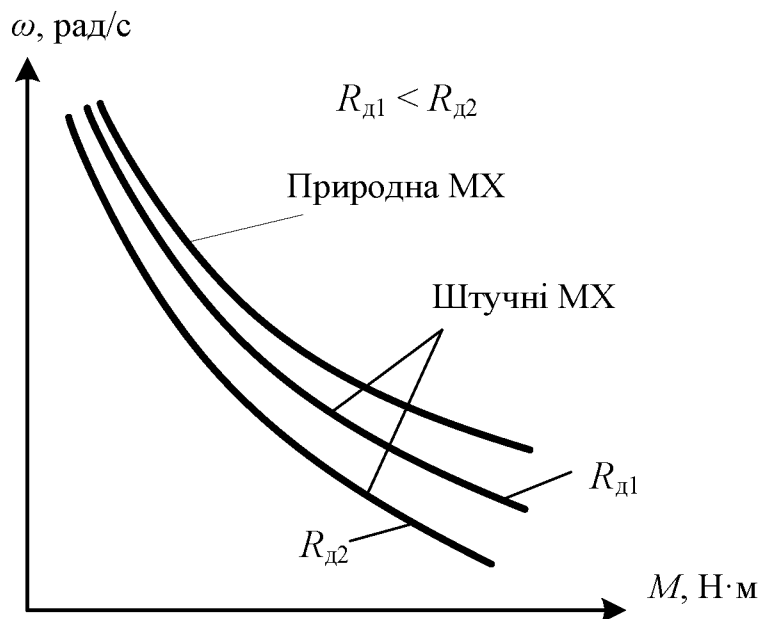


Рисунок 4 – Природна та штучні механічні характеристики ДПС послідовного збудження

Розрахунок опору резисторів для пуску двигуна послідовного збудження виконується графоаналітичним методом, який не вимагає побудови самих реостатних характеристик.

За даними таблиці 2 у першому квадранті будуємо природну електромеханічну характеристику (ЕМХ) ДПС ПЗ $\omega = f(I)$ (рисунок 5). Задаємо значення пускового струму I_1 та струму перемикавання I_2 . Проводимо через знайдені значення струмів дві вертикальні лінії до перетину з природною електромеханічною характеристикою і знаходимо на природній характеристиці точки e і f , що відповідають цим струмам.

При цьому

$$I_1 = (1,8...2,5) \cdot I_H; \quad (5)$$

$$I_2 = (1,2...1,5) \cdot I_H. \quad (6)$$

У другому квадранті (рис. 5) будуємо залежності $\omega = f(R_1)$ і $\omega = f(R_2)$. Для цього у вибраному масштабі на осі абсцис відкладаємо опір якорного кола двигуна $R_{дв}$ – відрізок OK і проводимо вертикаль. З точок e і f проводимо горизонтальні лінії до перетину з вертикаллю в точках E і F . Друга точка прямих $\omega = f(R_1)$ і $\omega = f(R_2)$ лежить на осі абсцис.

При цьому $\omega = 0$; $R_1 = \frac{U}{I_1}$; $R_2 = \frac{U}{I_2}$.

У масштабі на осі абсцис відкладаємо значення опорів R_1 і R_2 (відповідно точки A і Q). З'єднуємо точки A і E та точки Q і F , одержуємо лінії $I_1 = \text{const}$ і $I_2 = \text{const}$, які характеризують лінійну залежність між швидкістю двигуна і опором його якірного кола при незмінному струмі якоря.

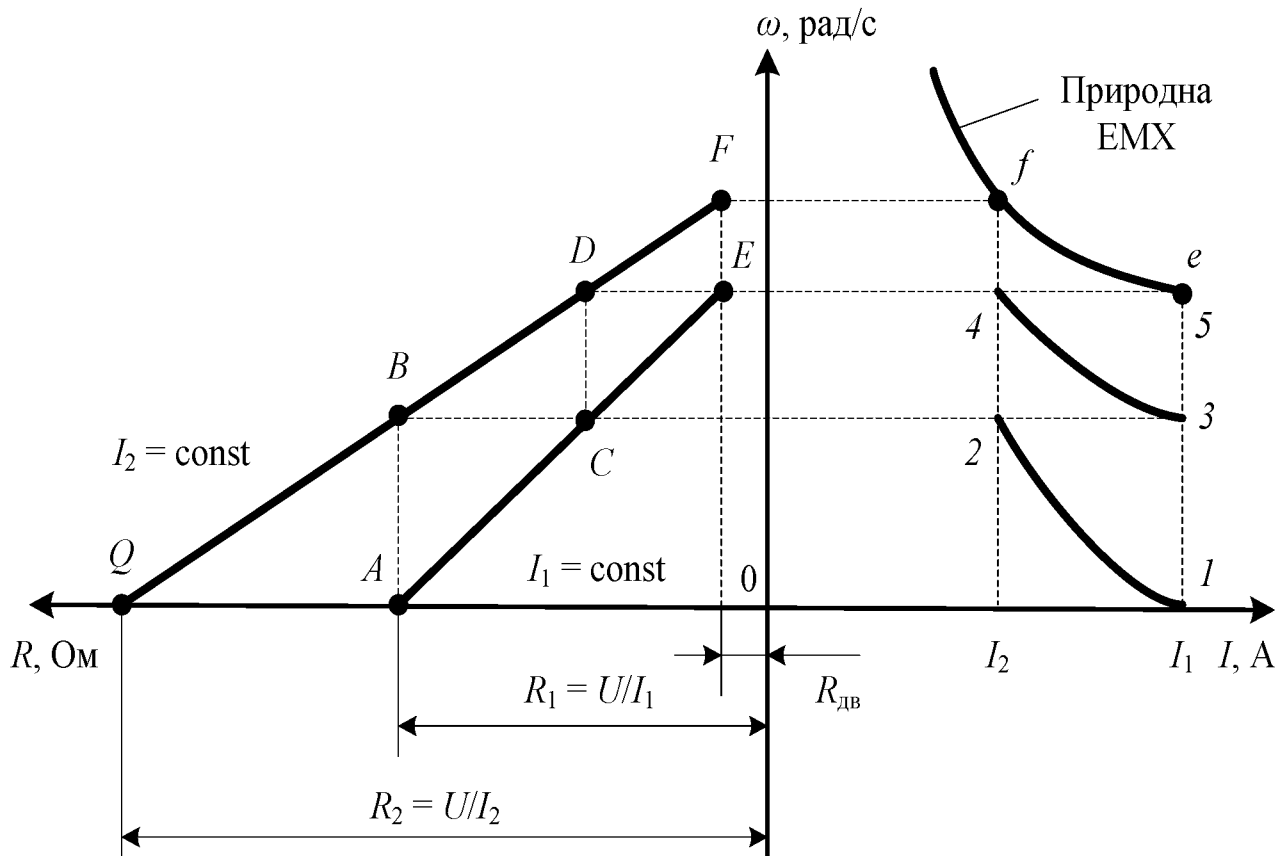


Рисунок 5 – Графічний метод визначення опорів пускових і гальмівних резисторів

Пуск двигуна починається при найбільшому опорі пускового резистора R_1 . Під дією пускового моменту двигун розганяється на штучній характеристиці $1-2$, його швидкість зростає (пряма AB), а струм спадає до значення I_2 . При цьому закорочується перша секція пускового резистора і струм зростає раптово до I_1 (пряма BC або $2-3$). Далі двигун буде розганятися відповідно до характеристики $3-4$. Його струм знову зменшується до I_2 (точка D), а після закорочення другої секції пускового реостата зростає до I_1 (пряма DE або $4-5$), після чого двигун переходить на природну електромеханічну характеристику і обертається із швидкістю, що відповідає його навантаженню. Якщо в результаті побудови, горизонтальна лінія,

проведена з точки D , не попаде в точку E або з точки 4 в точку 5 , що лежить на природній характеристиці, то слід змінити I_2 або I_1 (найчастіше змінюють тільки I_2) і повторити побудову. Після такої побудови величини опорів секцій пускового резистора знаходимо з рисунка 5, тобто відрізок BC в масштабі дорівнює опорі першої секції, а відрізок DE – опорі другої секції.

Перша ступінь пускового резистора дорівнює

$$R_{p1} = l_{BC} \cdot m_R, \quad (7)$$

де m_R – вибраний масштаб опорів, Ом/мм.

Друга ступінь пускового резистора дорівнює

$$R_{p2} = l_{DE} \cdot m_R, \quad (8)$$

Повний опір резистора пускового реостата дорівнює

$$R_p = R_{p1} + R_{p2}. \quad (9)$$

4 Приклад розрахунку

Для електродвигуна постійного струму послідовного збудження типу 4ПНМ180LO4 розрахувати і побудувати природну механічну характеристику, визначити значення опорів додаткових резисторів в колі якоря для зниження частоти обертання електродвигуна при $I = I_H$ до 700 об/хв. і 400 об/хв. Для знайдених значень опорів резисторів розрахувати і побудувати реостатні механічні характеристики.

Каталожні дані ДПС:

$$P_H = 11,0 \text{ кВт}; \quad U_H = 220 \text{ В}; \quad I_{яH} = 57,2 \text{ А}; \quad n_H = 1000 \text{ об/хв.}$$

Побудувати пускову діаграму електродвигуна і розрахувати значення опорів пускових резисторів. Пуск ДПС повинен бути виконаний в 3 ступені.

Принципова схема пуску ДПС послідовного збудження в три ступені представлена на рисунку 6.

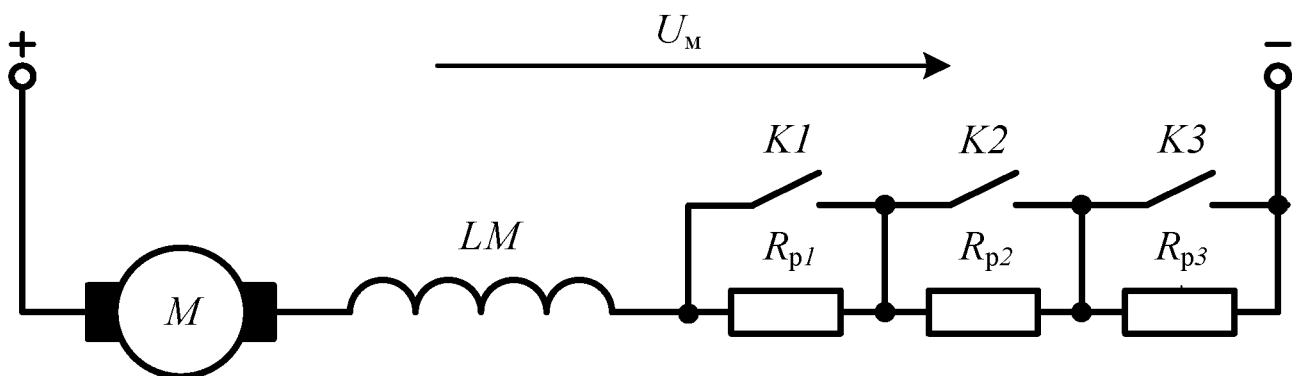


Рисунок 6 – Принципова електрична схема пуску двигуна постійного струму

послідовного збудження в три ступені
Універсальні характеристики приведені на рисунку 2.
Відносні величини визначаються з рівнянь

$$I^* = \frac{I_i}{I_H}; \quad M^* = \frac{M_i}{M_H}; \quad \omega^* = \frac{\omega_i}{\omega_H}.$$

Знаходимо номінальний момент і номінальну кутову швидкість для ДПС

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H},$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_H – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30},$$

де n_H – номінальна частота обертання, об/хв.

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$M_H = \frac{11,0 \cdot 10^3}{104,67} = 105,1 \text{ Н·м}.$$

Розрахункові значення для побудови природних механічної $\omega = f(M)$ та електромеханічної $\omega = f(I)$ характеристик ДПС ПЗ представляємо у вигляді таблиці 3. Розрахункові величини знаходимо за виразами

$$I = I^* \cdot I_H; \quad M = M^* \cdot M_H; \quad \omega = \omega^* \cdot \omega_H.$$

Таблиця 3 – Розрахункові значення для побудови природної механічної і електромеханічної характеристики ДПС ПЗ

I^* , в.о.	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
M^* , в.о.	0,18	0,29	0,52	0,76	1,0	1,26	1,5	1,8	2,07	2,47
ω^* , в.о.	1,8	1,58	1,28	1,1	1,0	0,89	0,81	0,75	0,7	0,68
I , А	17,16	22,88	34,32	45,76	57,2	68,64	80,08	91,52	102,96	114,4
M , Н·м	18,92	30,48	54,65	79,88	105,1	132,43	157,65	189,18	217,56	259,6

ω , рад/с	188,41	165,38	133,98	115,14	104,67	93,16	84,78	78,5	73,27	71,18
------------------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	------	-------	-------

Природна механічна характеристика електродвигуна 4ПНМ180LO4, побудована за даними таблиці 3, представлена на рисунку 7.

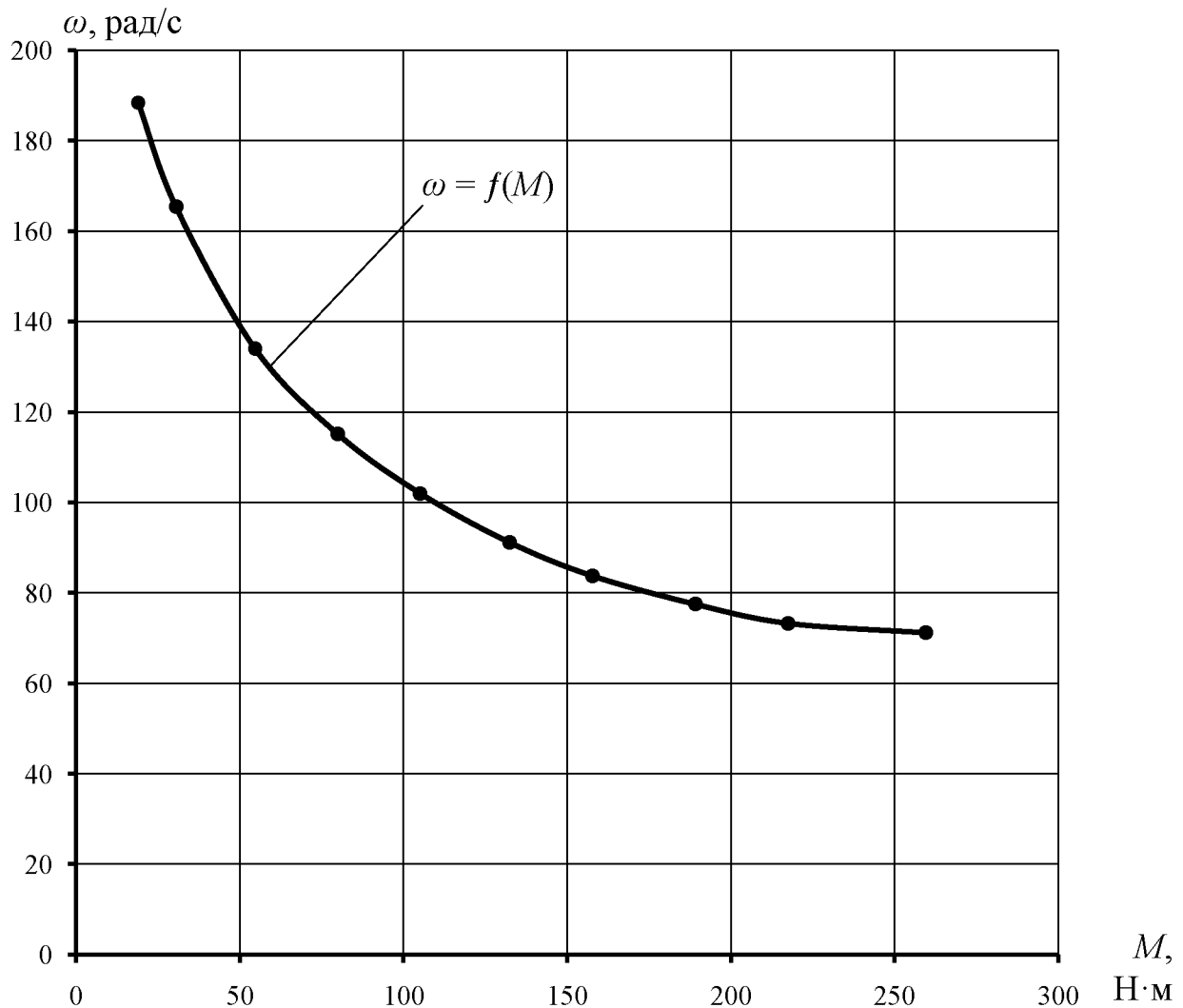


Рисунок 7 – Природна механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження 4ПНМ180LO4

Для побудови штучних механічних характеристик визначаємо величину додаткового резистора, який необхідно ввести в коло якоря для забезпечення заданої швидкості обертання електродвигуна за формулою

$$R_p = \left(1 - \frac{n_i}{n_n}\right) \cdot (R_n - R_{дв}),$$

де R_n – номінальний опір двигуна, Ом.
Номінальний опір двигуна

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{220}{57,2} = 3,85 \text{ Ом.}$$

Внутрішній опір двигуна знаходимо за виразом

$$R_{\text{дв}} = R_{\text{я}} + R_{\text{зб}},$$

де $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря, Ом;
 $R_{\text{зб}}$ – опір обмотки збудження, Ом.
 Опір обмотки якоря розраховуємо за формулою

$$R_{\text{я}} \approx 0,75 \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}},$$

де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна, в.о.
 Визначаємо коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{ян}}};$$

$$\eta_{\text{н}} = \frac{11 \cdot 10^3}{220 \cdot 57,2} = 0,874;$$

$$R_{\text{я}} \approx 0,75 \cdot (1 - 0,874) \cdot \frac{220}{57,2} = 0,36 \text{ Ом.}$$

Опір послідовної обмотки збудження приблизно дорівнює

$$R_{\text{зб}} \approx 0,5 \cdot R_{\text{я}};$$

$$R_{\text{зб}} \approx 0,5 \cdot 0,36 = 0,18 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{дв}} = 0,36 + 0,18 = 0,54 \text{ Ом.}$$

Опір додаткового резистора в колі якоря, який необхідно ввести для зниження швидкості обертання до 700 об/хв. Дорівнює

$$R_{\text{р1}} = \left(1 - \frac{700}{1000}\right) \cdot (3,85 - 0,54) = 0,99 \text{ Ом.}$$

Опір додаткового резистора в колі якоря, який необхідно ввести для зниження швидкості обертання до 400 об/хв. дорівнює

$$R_{p2} = \left(1 - \frac{400}{1000}\right) \cdot (3,85 - 0,54) = 1,99 \text{ Ом.}$$

Для знайдених значень опорів резисторів розраховуємо і будуємо реостатні механічні характеристики ДПС ПЗ 4ПНМ180LO4.

Для швидкості обертання двигуна $n_1 = 700$ об/хв.

$$\omega_{n1} = \frac{3,14 \cdot 700}{30} = 73,3 \text{ рад/с.}$$

Для швидкості обертання двигуна $n_2 = 400$ об/хв.

$$\omega_{n2} = \frac{3,14 \cdot 400}{30} = 41,9 \text{ рад/с.}$$

Розрахункові значення для побудови реостатних механічних характеристик ДПС послідовного збудження при швидкості обертання $n_1 = 700$ об/хв. та $n_2 = 400$ об/хв. зводимо до таблиці 4. Реостатні характеристики представлені на рисунку 8.

Таблиця 4 – Розрахункові значення для побудови реостатних механічних характеристик ДПС ПЗ

M , Н·м	18,92	30,48	54,65	79,88	105,1	132,43	157,65	189,18	217,56	259,6
ω^* , в.о.	1,8	1,58	1,28	1,1	1,0	0,89	0,81	0,75	0,7	0,68
ω_1 , рад/с	131,9	115,8	93,8	80,6	73,3	65,2	59,4	55,0	51,3	49,8
ω_2 , рад/с	75,4	66,2	53,6	46,1	41,9	37,3	33,9	31,4	29,3	28,5

Для розрахунку опорів резисторів для пуску ДПС ПЗ за даними таблиці 3 будуємо природну електромеханічну характеристику електродвигуна 4ПНМ180LO4 (рисунок 9) і відмічаємо на ній точки допустимих струмів I_1 та I_2 при перемиканні з однієї ступені резистора на іншу.

При цьому приймаємо

$$I_1 = (1,8 \dots 2,5) \cdot I_H;$$

$$I_1 = 1,8 \cdot 57,2 = 103 \text{ А};$$

$$I_2 = (1,2 \dots 1,5) \cdot I_H;$$

$$I_2 = 1,31 \cdot 57,2 = 74,9 \text{ A.}$$

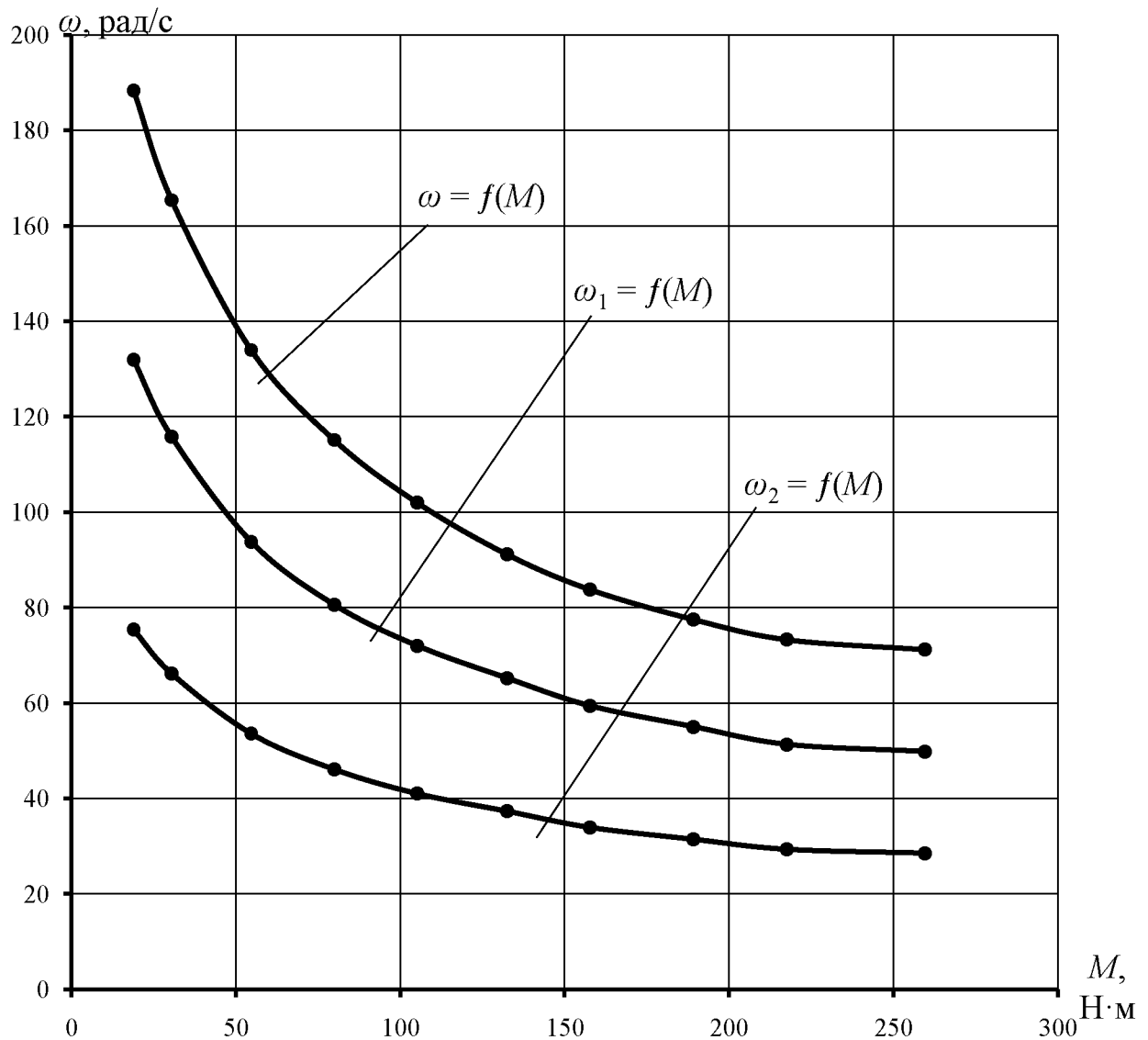


Рисунок 8 – Природна та реостатні механічні характеристики
ДПС послідовного збудження 4ПНМ180ЛО4

Приймаємо масштаб опору рівним $m_R = 0,03 \text{ Ом/мм}$.

Визначаємо довжину відрізка OK

$$OK = \frac{R_{дв}}{m_R};$$

$$OK = \frac{0,54}{0,03} = 18 \text{ мм.}$$

Знаходимо величини опорів резисторів

$$R_1 = \frac{U}{I_1};$$

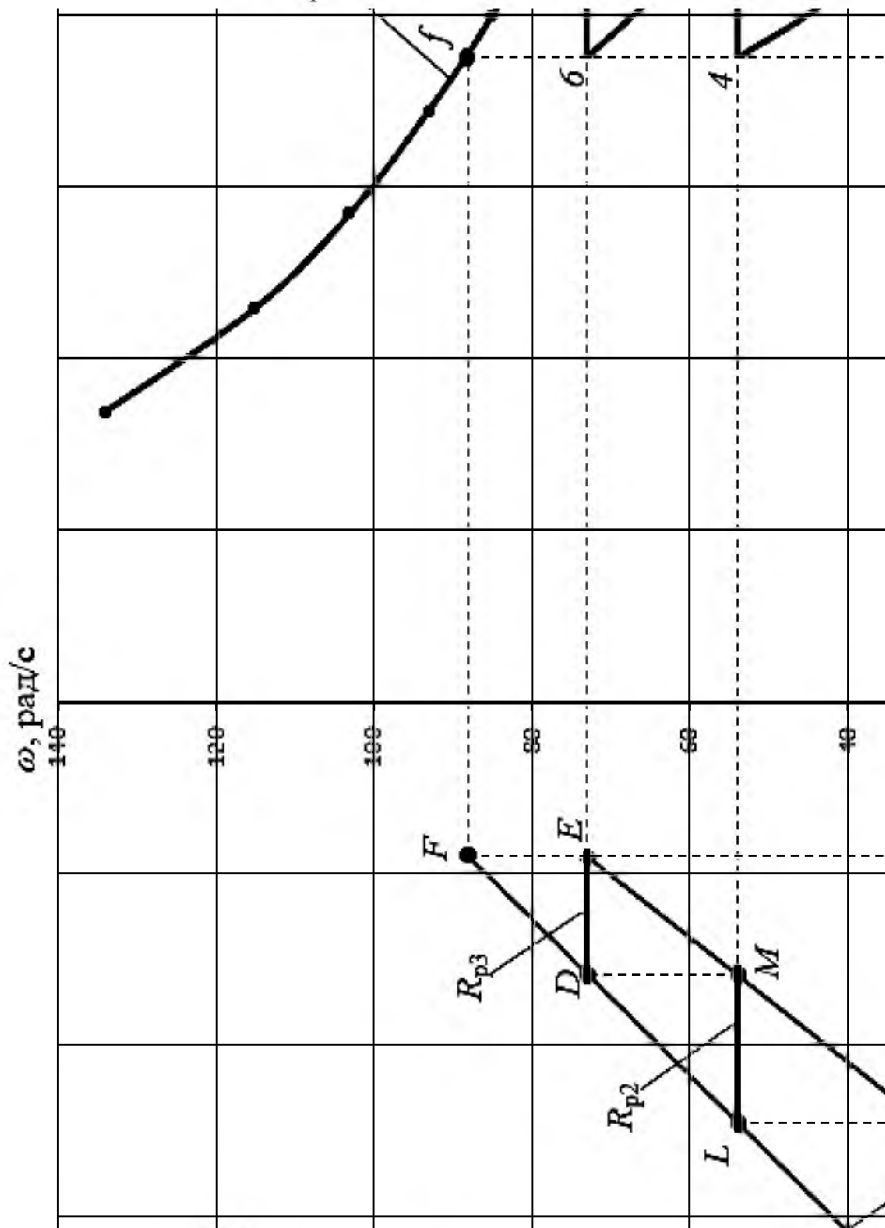


Рисунок 9 – Пускова діаграма постійного струму послідовного

$$R_1 = \frac{220}{103} = 2,14 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{U}{I_2};$$

$$R_2 = \frac{220}{74,9} = 2,94 \text{ Ом.}$$

Визначаємо довжину відрізків OA та OQ , враховуючи вибраний масштаб опору

$$OA = \frac{R_1}{m_R};$$

$$OA = \frac{2,14}{0,03} = 71,3 \text{ мм};$$

$$OQ = \frac{R_2}{m_R};$$

$$OQ = \frac{2,94}{0,03} = 98 \text{ мм}.$$

Перша ступень опору пускового резистора дорівнює

$$R_{p1} = m_R \cdot I_{BC};$$

$$R_{p1} = 0,03 \cdot 21 = 0,63 \text{ Ом}.$$

Друга ступень опору пускового резистора дорівнює

$$R_{p2} = m_R \cdot I_{LM};$$

$$R_{p2} = 0,03 \cdot 17 = 0,51 \text{ Ом}.$$

Третя ступень опору пускового резистора дорівнює

$$R_{p3} = m_R \cdot I_{DE};$$

$$R_{p3} = 0,03 \cdot 15 = 0,45 \text{ Ом}.$$

Повний опір резисторів пускового реостата дорівнює

$$R_p = R_{p1} + R_{p2} + R_{p3};$$

$$R_p = 0,63 + 0,51 + 0,45 = 1,59 \text{ Ом}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули.
- 3 Принципову електричну схему пуску ДПС послідовного збудження з кількістю ступенів пуску згідно індивідуального завдання.
- 4 Природну механічну характеристику ДПС послідовного збудження та штучні механічні характеристики, побудовані при різних швидкостях

обертання двигуна.

5 Пускову діаграму ДПС послідовного збудження.

6 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

1 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками двигуна постійного струму?

2 Що називається природною та штучною характеристиками двигуна постійного струму?

3 Які технічні дані двигуна постійного струму наводяться в його паспортних даних?

4 Поясніть порядок побудови природних механічної та електромеханічної характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) з використанням універсальних характеристик.

5 Що представляють собою універсальні механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження?

6 Чому механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження криволінійні?

7 Чи можна отримати в двигуні постійного струму послідовного збудження режим генераторного рекуперативного гальмування?

8 Як визначити номінальний опір двигуна за його паспортними даними?

9 Як визначити внутрішній опір двигуна?

10 Як приблизно визначити величину опору внутрішнього кола якоря ДПС послідовного збудження за каталоговими даними?

11 Як за каталоговими даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?

12 Як за каталоговими даними визначити номінальний момент на валу електродвигуна?

13 З якою метою при пуску ДПС послідовного збудження в коло якоря вводять пусковий реостат?

14 Наведіть принципову схему вмикання двигуна постійного струму послідовного збудження.

15 Який вигляд мають природні електромеханічна і механічна характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження?

16 Як зміняться швидкість обертання двигуна постійного струму послідовного збудження та жорсткість механічних характеристик із збільшенням додаткового опору в якірному колі?

17 Як визначити додатковий опір в колі якоря двигуна постійного струму послідовного збудження за відомих координат хоча б однієї точки штучної і природної електромеханічної характеристики?

18 За яких обставин двигун постійного струму послідовного збудження «іде в разнос»?

19 Як побудувати пускову діаграму двигуна постійного струму

послідовного збудження при додаткових опорах у колі якоря?

20 Як розрахувати опори пускового реостата двигуна постійного струму послідовного збудження графічним способом?

21 Як визначити коефіцієнт корисної дії електродвигуна при номінальному навантаженні?

22 Наведіть рівняння штучної реостатної електромеханічної характеристики.

23 Чому двигун постійного струму послідовного збудження не можна включати в мережу без навантаження на валу?

24 Який вигляд мають природні механічна та електромеханічна характеристики ДПС послідовного збудження?

25 Як впливає зміна додаткового опору в колі якоря на вид механічної та електромеханічної характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик і опорів пускових резисторів асинхронного електродвигуна з фазним ротором з використанням каталогових даних; навчитися будувати природну механічну характеристику та пускову діаграму асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 79-101; 2, с. 38-49; 5, с. 74-82].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором з використанням каталогових даних.

1.3 Ознайомитися з методикою побудови пускової діаграми та розрахунку опору пускових резисторів асинхронного електродвигуна (АД) з фазним ротором.

1.4 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати природну механічну характеристику $\omega = f(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

2.2 Розрахувати і побудувати пускову діаграму АД з фазним ротором.

2.3 Визначити опір пускових резисторів АД з фазним ротором.

3 Загальні відомості і рекомендації

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені в сільському господарстві прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором. В окремих випадках використовують трифазні АД з фазним ротором, синхронні, однофазні АД з короткозамкненим ротором, універсальні колекторні двигуни та інші.

Асинхронні електродвигуни з фазним ротором складніші за конструкцією, дорожчі і менш надійні в експлуатації, ніж короткозамкнені, але завдяки можливості змінювати в них опір кола ротора можна регулювати параметри їх механічних характеристик.

Трифазні асинхронні електродвигуни з фазним ротором застосовують там, де необхідно регулювати частоту обертання в невеликих діапазонах, обмежувати пусковий струм або змінювати початковий пусковий момент. Для цього в коло ротора вмикають регульовальний опір.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Тип електродвигуна	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/хв.	R'_2 , Ом	$\cos\varphi_{\text{н}}$, в.о.	$\eta_{\text{н}}$, %	$\mu_{\text{к}}$	$E_{2\text{к}}$, В	Кількість ступеней
1	4АК160S4У3	11,0	1434	0,499	0,86	86,5	3,0	305	2
2	4АК160М4У3	14,0	1445	0,334	0,87	88,5	3,5	300	2
3	4АК180М4У3	18,5	1457	0,208	0,88	89,0	4,0	295	2

4	4AK200M4Y3	22,0	1463	0,134	0,87	90,0	4,0	340	2
5	4AK200L4Y3	30,0	1463	0,114	0,87	90,5	4,0	350	2
6	4AK225M4Y3	37,0	1448	0,083	0,87	90,0	3,0	160	4
7	4AK250SA4Y3	45,0	1455	0,078	0,88	91,5	3,0	230	4
8	4AK250SB4Y3	55,0	1465	0,054	0,90	90,5	3,0	200	4
9	4AK250M4Y3	71,0	1463	0,034	0,86	91,5	3,0	250	3
10	4AK160M6Y3	10,0	957	0,539	0,76	84,5	3,8	310	2
11	4AK180M6Y3	13,0	956	0,434	0,80	85,5	4,0	325	2
12	4AK200M6Y3	18,5	965	0,212	0,81	88,0	3,5	360	3
13	4AK200L6Y3	22,0	965	0,19	0,80	88,0	3,5	330	3
14	4AK225M6Y3	30,0	965	0,109	0,85	89,0	2,5	140	4
15	4AK250S6Y3	37,0	965	0,07	0,84	89,0	2,5	150	4
16	4AK250M6Y3	45,0	975	0,06	0,87	90,5	2,5	180	4
17	4AK160S8Y3	5,5	702	1,384	0,70	80,0	2,5	300	3
18	4AK160M8Y3	7,1	709	0,924	0,70	82,0	3,0	290	2
19	4AK180M8Y3	11,0	717	0,502	0,72	85,5	3,5	270	2
20	4AK200M8Y3	15,0	724	0,279	0,70	86,0	3,0	360	3
21	4AK200L8Y3	18,5	724	0,226	0,73	86,0	3,0	300	4
22	4AK225M8Y3	22,0	716	0,202	0,82	87,0	2,2	102	4
23	4AK250S8Y3	30,0	720	0,118	0,81	88,5	2,2	125	4
24	4AK250M8Y3	37,0	724	0,086	0,80	89,0	2,2	148	3
25	4АНК160М4У3	17,0	1439	0,306	0,87	88,0	3,5	315	2

Схема вмикання трифазного АД з фазним ротором зображена на рисунку 1.

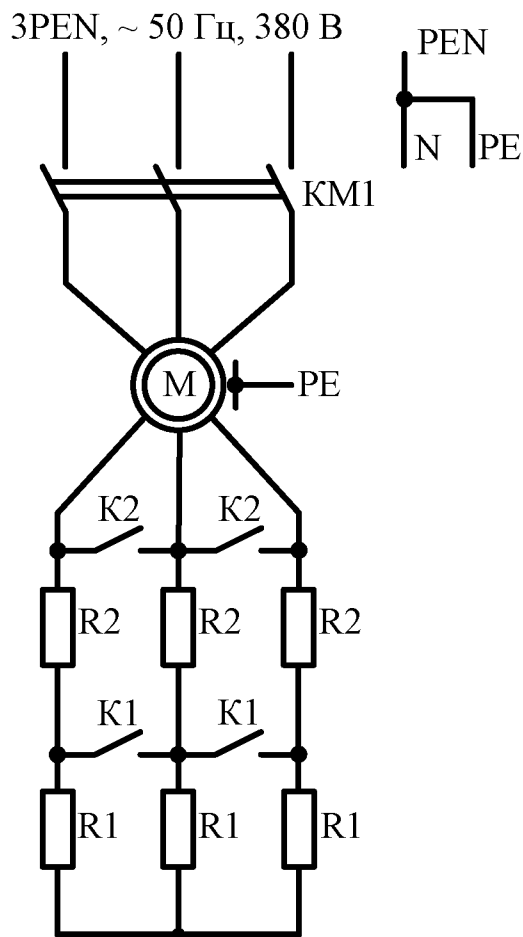


Рисунок 1 – Схема пуску АД з фазним ротором в дві ступені

Механічною характеристикою електродвигуна обертового руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M_{\text{дв}})$.

Механічну характеристику електродвигуна при номінальній напрузі живлення розраховують на основі формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}}, \quad (1)$$

приймаючи $a \approx 1$, де

$$a = \frac{R_1}{R_2'},$$

де R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;
 R_2' – приведений активний опір кола ротора, Ом,
отримаємо

$$M = \frac{2M_{\kappa} \cdot (1 + S_{\kappa})}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} + 2S_{\kappa}}. \quad (2)$$

де M_{κ} – максимальний (критичний) момент електродвигуна, Н·м;
 S_{κ} – критичне ковзання двигуна, яке відповідає максимальному обертовому моменту, в.о.;
 S_i – поточне значення ковзання, в.о.
 Максимальний (критичний) момент електродвигуна, M_{κ} , Н·м, визначається за формулою

$$M_{\kappa} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\kappa}, \quad (3)$$

де $M_{\text{н}}$ – номінальний момент електродвигуна, Н·м;
 μ_{κ} – кратність максимального (критичного) моменту двигуна, в.о.
 Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (4)$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт;
 $\omega_{\text{н}}$ – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.
 Номінальна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30}, \quad (5)$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.
 Критичне ковзання визначається за формулою

$$S_{\kappa} = S_{\text{н}} \cdot \frac{\mu_{\kappa} + \sqrt{\mu_{\kappa}^2 - 1 + 2 \cdot S_{\text{н}} \cdot (\mu_{\kappa} - 1)}}{1 - 2 \cdot S_{\text{н}} \cdot (\mu_{\kappa} - 1)}, \quad (6)$$

де $S_{\text{н}}$ – номінальне ковзання АД, в.о.
 Номінальне ковзання АД визначається за формулою

$$S_{\text{н}} = \frac{n_0 - n_{\text{н}}}{n_0}. \quad (7)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.

Синхронна швидкість обертання n_0 , об/хв., визначається за формулою

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (8)$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів.

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - S_k). \quad (9)$$

Перехід від ковзання S до кутової швидкості виконується за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i), \quad (10)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}, \quad (11)$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів.

Дані розрахунку механічної характеристики АД з фазним ротором $\omega = f(M_{\text{дв}})$ звести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані розрахунків механічної характеристики АД

S , в.о.	0			$S_{\text{н}}$			$S_{\text{к}}$		
ω , рад/с	ω_0			$\omega_{\text{н}}$			$\omega_{\text{к}}$		
M , Н·м	0			$M_{\text{н}}$			$M_{\text{к}}$		

В прямокутній системі координат за даними таблиці 2 будуємо природну механічну характеристику АД з фазним ротором (рисунок 2).

Розрахунок опорів резисторів для пуску двигуна виконуємо графо-аналітичним методом. Для цього задаємо значення моментів M_1 – початковий пусковий момент і M_2 – момент перемикавання

$$M_1 = (0,7 \dots 0,85) \cdot M_{\text{к}}; \quad (12)$$

$$M_2 = (1,1 \dots 1,5) \cdot M_{\text{н}}. \quad (13)$$

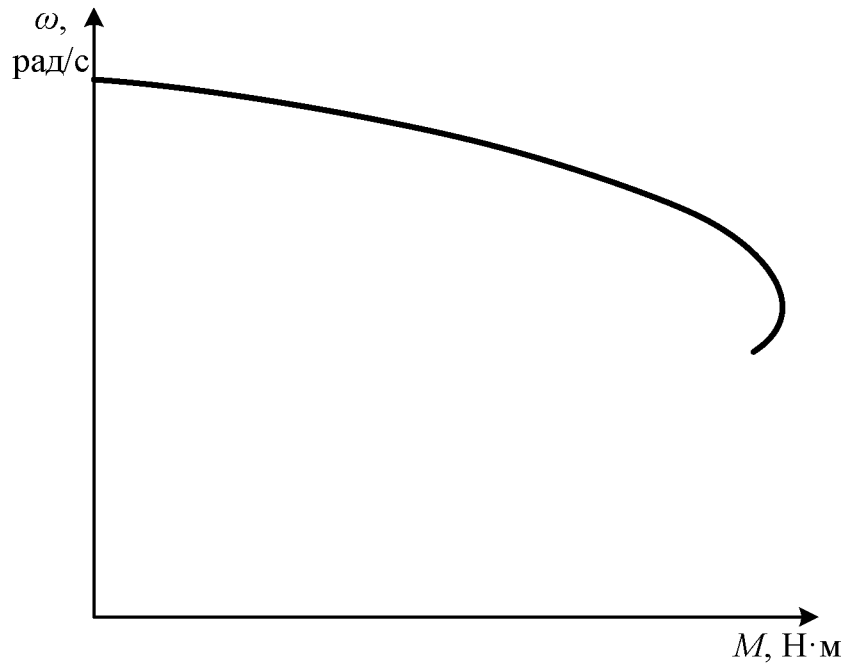


Рисунок 2 – Природна механічна характеристика АД з фазним ротором

Через визначені значення моментів M_1 і M_2 проводимо прямі, паралельні осі ординат, позначаючи точки їх перетину з механічною характеристикою асинхронного електродвигуна з фазним ротором точками a і b (рисунок 3).

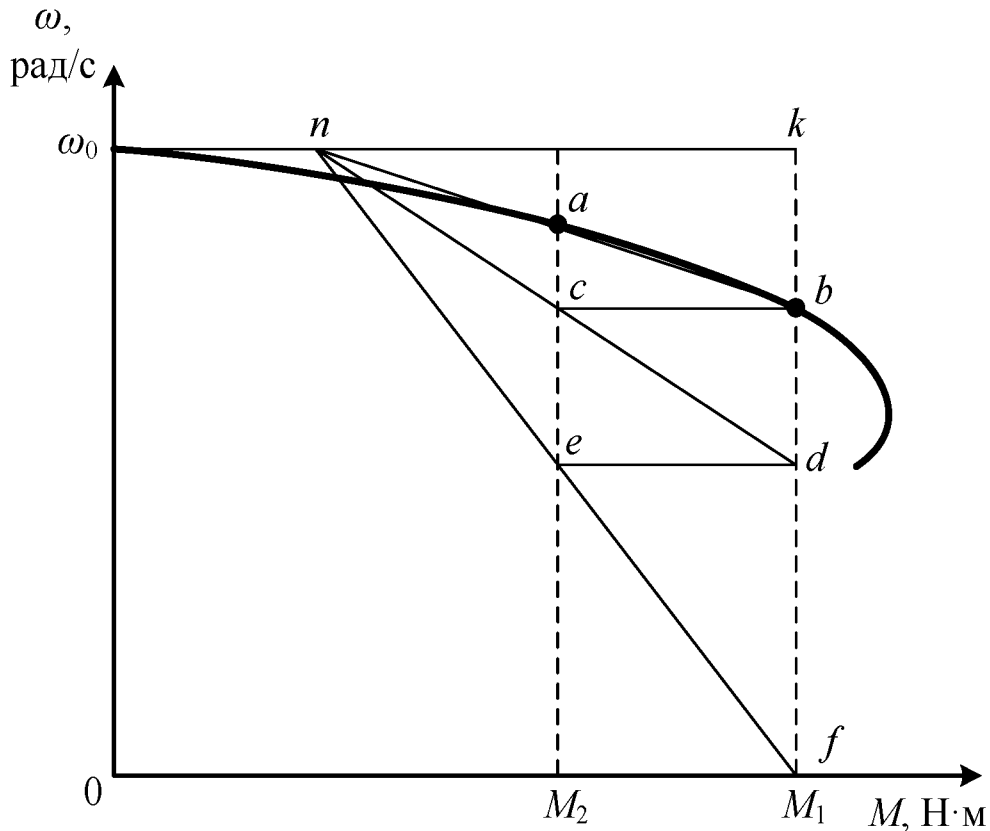


Рисунок 3 – Пускова діаграма АД з фазним ротором в дві ступені

Через точку ω_0 проводимо пряму, паралельну осі абсцис. Через точки a і b проводимо пряму до перетину з горизонталлю в точці n – полюсом побудови реостатних механічних характеристик, за якими відбувається процес пуску на ступенях пускового реостата. Через точки n і f проводимо пряму. Точку перетину прямої nf з прямою, проведеною з M_2 позначаємо точкою e . Потім через точку e проводимо лінію, паралельну осі абсцис, до перетину з прямою fk , проведеною з M_1 та отримуємо точку d . Аналогічно будуються лінії dn і cb . Побудова вважається закінченою, якщо при заданій кількості ступенів пускового резистора (в конкретному випадку 2 ступені) при шунтуванні останньої ступені пускового реостата момент АД збільшується до значення M_1 на природній механічній характеристиці.

4 Приклад розрахунку

Для асинхронного електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3 розрахувати і побудувати природну механічну характеристику.

Каталожні дані АД з фазним ротором:

$$P_H = 7,5 \text{ кВт}; \quad E_{2K} = 300 \text{ В}; \quad \mu_K = 3,5; \quad n_H = 950 \text{ об/хв.}; \\ R'_2 = 1,18 \text{ Ом}; \quad \eta_H = 82,5 \%; \quad \cos\varphi_H = 0,77.$$

Побудувати пускову діаграму електродвигуна і розрахувати значення опорів пускових резисторів. Пуск АД повинен бути виконаний в 2 ступені.

Принципова електрична схема пуску АД з фазним ротором в дві ступені представлена на рисунку 4.

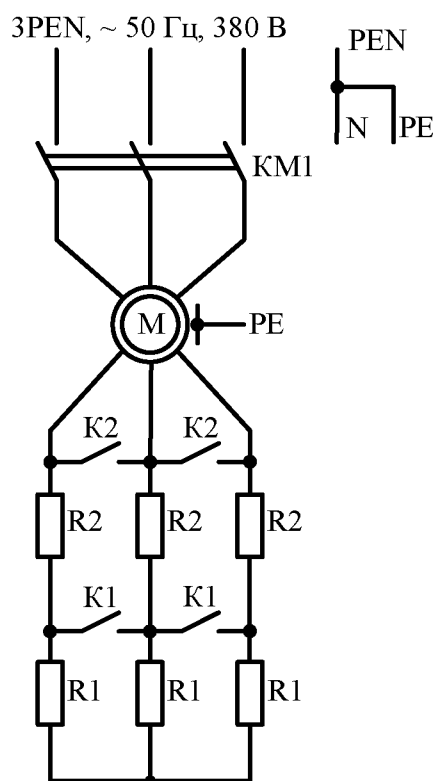


Рисунок 4 – Схема пуску АД з фазним ротором в 2 ступені

Розрахунок механічної характеристики асинхронного двигуна проводимо на основі уточненої формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot S_{\kappa})}{\frac{S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S_i} + 2 \cdot a \cdot S_{\kappa}},$$

де M_{κ} – критичний (максимальний) момент, який розвиває двигун, Н·м;

$a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до

приведеного активного опору обмотки ротора, в.о. Приймаємо $a \approx 1$;

S_i – поточне ковзання, в.о.;

S_{κ} – критичне значення ковзання, в.о., яке відповідає максимальному обертовому моменту, в.о.

Максимальний (критичний) момент електродвигуна, M_{κ} , Н·м, визначаємо за формулою

$$M_{\kappa} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\kappa},$$

де $M_{\text{н}}$ – номінальний момент електродвигуна, Н·м;

μ_{κ} – кратність максимального моменту двигуна, в.о.

Номінальний момент визначаємо за формулою

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт.

$\omega_{\text{н}}$ – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

Номінальну кутову швидкість визначаємо за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30},$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальна швидкість обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3,14 \cdot 950}{30} = 99,4 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{н}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{99,4} = 75,45 \text{ Н·м};$$

$$M_k = 75,45 \cdot 3,5 = 264,08 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичне ковзання визначаємо за формулою

$$S_k = S_H \cdot \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2 \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)},$$

де S_H – номінальне ковзання АД, в.о.

Номінальне ковзання АД визначаємо за формулою

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0},$$

де n_0 – синхронна швидкість обертання, об/хв.;

n_H – номінальна швидкість обертання електродвигуна, об/хв.

Синхронну частоту обертання n_0 , об/хв., визначаємо за формулою

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3 $p = 3$. Тоді

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$S_H = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05;$$

$$S_k = 0,05 \cdot \frac{3,5 + \sqrt{3,5^2 - 1 + 2 \cdot 0,05 \cdot (3,5 - 1)}}{1 - 2 \cdot 0,05 \cdot (3,5 - 1)} = 0,45.$$

Критичну кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначаємо за формулою

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - S_k),$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$\omega_k = 104,67 \cdot (1 - 0,45) = 57,6 \text{ рад/с}.$$

Перехід від ковзання S до кутової швидкості виконуємо за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i).$$

Дані розрахунку механічної характеристики асинхронного електродвигуна з фазним ротором $\omega = f(M_{\text{дв}})$ зводимо до таблиці 3.

Таблиця 3 – Дані розрахунків механічної характеристики АД

S , в.о.	0	0,02	0,04	$S_{\text{н}}$ 0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	$S_{\text{к}}$ 0,45	0,5	0,6
ω , рад/с	ω_0 104,67	102,6	100,5	$\omega_{\text{н}}$ 99,4	97,3	94,2	83,7	73,3	62,8	$\omega_{\text{к}}$ 57,6	52,3	41,9
M , Н·м	0	32,7	62,57	$M_{\text{н}}$ 75,45	102,3	136,1	213,1	249,7	262,8	$M_{\text{к}}$ 264,08	263,1	256,7

В прямокутній системі координат за даними таблиці 3 будуємо природну механічну характеристику АД з фазним ротором (рисунок 5).

Для побудови пускової діаграми електродвигуна 4AK160S6Y3 задаємо значення моментів: початкового пускового моменту M_1 і моменту перемикавання M_2

$$M_1 = (0,7 \dots 0,85) \cdot M_{\text{к}};$$

$$M_1 = 0,7 \cdot 264,08 = 184,9 \text{ Н·м};$$

$$M_2 = (1,1 \dots 1,5) \cdot M_{\text{н}};$$

$$M_2 = 1,29 \cdot 75,45 = 97,3 \text{ Н·м}.$$

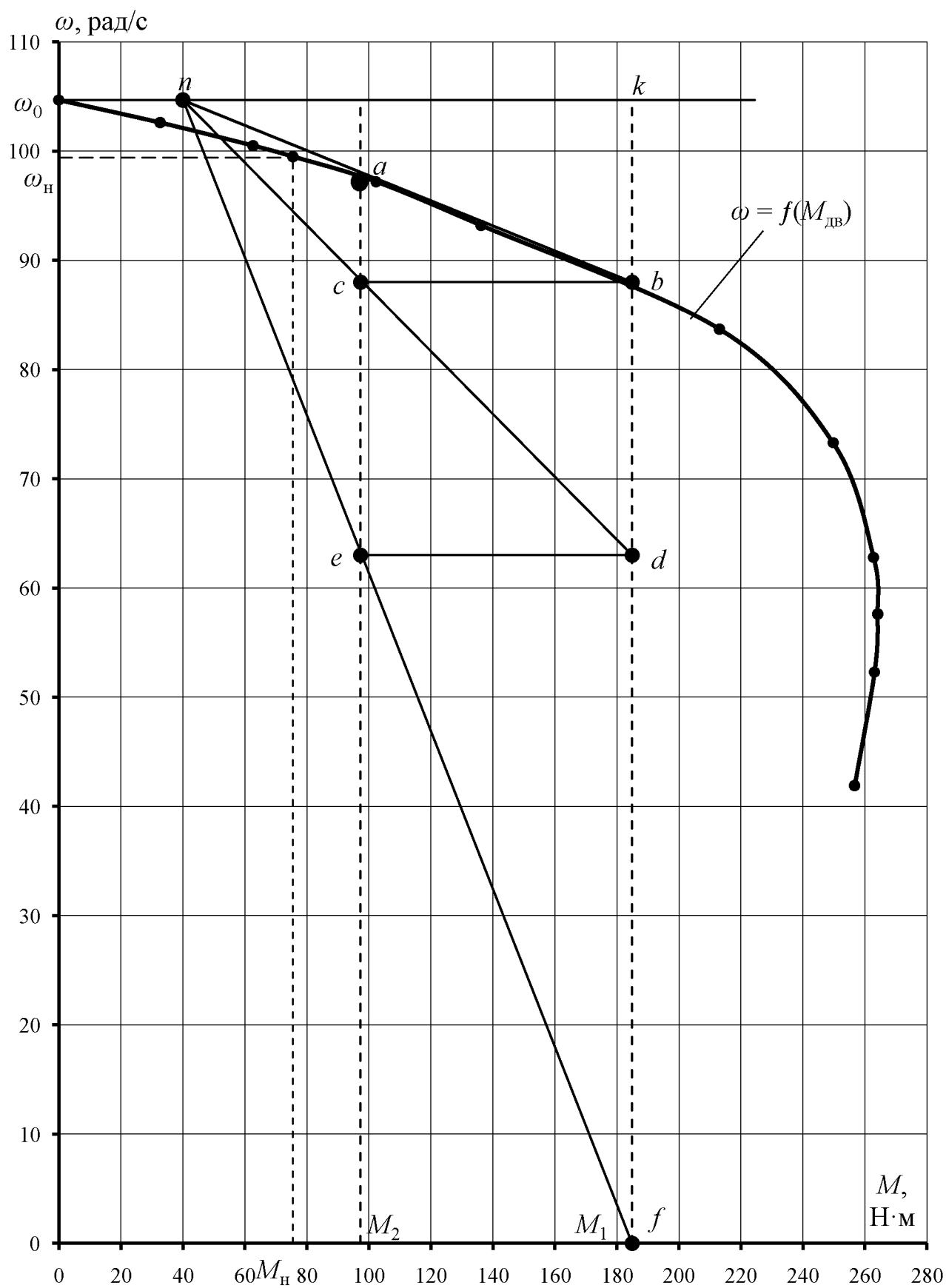


Рисунок 5 – Природна механічна характеристика та пускова діаграма АД з фазним ротором серії 4AK160S6Y3 в дві ступені

Визначаємо значення опору обмотки ротора R_2 , оскільки в каталожних даних задається значення активного опору фази обмотки ротора R'_2 , зведене до обмотки статора за формулою

$$R_2 = R'_2 \cdot \left(\frac{E_{2к}}{U_H} \right)^2;$$

$$R_2 = 1,18 \cdot \left(\frac{300}{380} \right)^2 = 0,74 \text{ Ом.}$$

Визначаємо масштаб опору

$$m_R = \frac{R_2}{l_{bk}};$$

$$m_R = \frac{0,74}{17} = 0,044 \text{ Ом/мм.}$$

Визначаємо значення опорів пускових резисторів – перша ступень реостата дорівнює

$$R_{п1} = l_{fd} \cdot m_R;$$

$$R_{п1} = 63 \cdot 0,044 = 2,77 \text{ Ом};$$

– друга ступень реостата дорівнює

$$R_{п2} = l_{db} \cdot m_R;$$

$$R_{п2} = 25 \cdot 0,044 = 1,1 \text{ Ом.}$$

Повний опір пускового реостата дорівнює

$$R_p = R_{п1} + R_{п2};$$

$$R_p = 2,77 + 1,1 = 3,87 \text{ Ом.}$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули.
- 3 Принципову електричну схему пуску АД з фазним ротором з кількістю ступенів пуску згідно індивідуального завдання.
- 4 Природну механічну характеристику АД з фазним ротором.
- 5 Пускову діаграму АД з фазним ротором.
- 6 Розрахункові дані опорів пускових резисторів.
- 7 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Які технічні дані асинхронного електродвигуна з фазним ротором даються в каталозі?
- 2 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 3 Що називається природною та штучною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 4 Як визначається синхронна швидкість обертання АД?
- 5 Як визначається синхронна кутова швидкість АД?
- 6 Як за каталоговими даними визначити номінальний момент на валу АД?
- 7 Як за каталоговими даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?
- 8 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна? Як воно пов'язане зі швидкістю ротора і як його визначити?
- 9 Що таке критичне ковзання асинхронного двигуна і від чого воно залежить?
- 10 Що таке максимальний момент та яким чином його можна розрахувати за каталоговими даними електродвигуна?
- 11 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні АД?
- 12 Як розраховувати поточне значення моменту для побудови механічної характеристики АД?
- 13 Який вигляд має природна механічна характеристика АД з фазним ротором?
- 14 Яка методика розрахунку пускових резисторів АД з фазним ротором?
- 15 За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором з використанням каталогових даних.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 79-111; 2, с. 38-49; 5, с. 74-82].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором з використанням каталогових даних.

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати механічну характеристику трифазного АД з короткозамкненим ротором $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ при номінальній напрузі живлення з використанням каталогових даних.

2.2 Розрахувати і побудувати механічну характеристику трифазного АД з короткозамкненим ротором $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ при зниженій напрузі мережі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги, згідно варіанта індивідуального завдання.

3 Загальні відомості і рекомендації

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені в сільському господарстві прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором. В окремих випадках використовують трифазні АД з фазним ротором, синхронні, однофазні АД з короткозамкненим ротором, універсальні колекторні двигуни та інші.

Механічною характеристикою електродвигуна обертового руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M_{\text{дв}})$ (рисунок 1).

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна розраховується за уточненою формулою Клосса з її інтерполяцією в пусковій частині відносно мінімального і пускового моментів двигуна, розрахованих через каталожні кратності цих моментів

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}}, \quad (1)$$

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електро- двигуна	$P_{\text{н}},$ кВт	$n_{\text{н}},$ об/хв.	$I_{\text{н}},$ А	$\eta_{\text{н}},$ %	$\cos\varphi_{\text{н}},$ в.о.	K_i	$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{мін}}$	$\mu_{\text{к}}$	$J_{\text{дв}},$ кг·м ²	$K_U,$ в.о.
1	АИР80А2У3	1,5	2850	3,31	81	0,85	7,0	2,1	1,6	2,2	0,0018	0,75
2	АИР80В2У3	2,2	2850	4,63	83	0,87	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0021	0,8
3	АИР71А2У3	0,75	2820	1,75	78,5	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	0,00097	0,85
4	АИР71В2У3	1,1	2800	2,55	79	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	0,0011	0,78
5	АИР90L2У3	3,0	2850	6,13	84,5	0,88	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0035	0,87
6	АИР100S2У3	4,0	2850	7,94	87	0,88	7,5	2,0	1,6	2,2	0,0059	0,88
7	АИР100L2У3	5,5	2850	10,7	88	0,89	7,5	2,0	1,6	2,2	0,0075	0,76
8	АИР160M2У3	18,5	2910	34,5	90,5	0,9	7,0	2,0	1,8	2,7	0,043	0,85
9	АИР132M2У3	11,0	2910	21,1	88	0,90	7,5	1,6	1,2	2,2	0,023	0,86
10	АИР160S2У3	15,0	2910	28,5	90	0,89	7,0	1,8	1,7	2,7	0,039	0,77
11	АИР80А4У3	1,1	1395	2,75	75	0,81	5,5	2,2	1,6	2,2	0,0032	0,9
12	АИР80В4У3	1,5	1395	3,52	78	0,83	5,5	2,2	1,6	2,2	0,0033	0,89
13	АИР90L4У3	2,2	1400	5,0	81	0,83	6,5	2,1	1,6	2,2	0,0056	0,75
14	АИР100S4У3	3,0	1410	6,7	82	0,83	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0087	0,87
15	АИР100L4У3	4,0	1410	8,5	85	0,84	7,0	2,0	1,6	2,2	0,011	0,81
16	АИР112M4У3	5,5	1430	11,4	85,5	0,86	7,0	2,0	1,6	2,2	0,017	0,79
17	АИР160S4У3	15,0	1455	28,5	90	0,89	7,0	1,9	1,8	2,9	0,078	0,9
18	АИР160M4У3	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	7,0	1,9	1,8	2,9	0,100	0,88
19	АИР160S6У3	11,0	970	22,9	88	0,83	6,5	2,0	1,6	2,7	0,120	0,78
20	АИР160M6У3	15,0	970	30,1	88	0,85	6,5	2,0	1,6	2,7	0,150	0,75
21	АИР80В6У3	1,1	920	3,05	74	0,74	4,5	2,0	1,6	2,2	0,0046	0,82
22	АИР90L6У3	1,5	925	4,2	76	0,72	6,0	2,0	1,6	2,2	0,0073	0,89
23	АИР100L6У3	2,2	945	5,6	81	0,74	6,0	2,0	1,6	2,2	0,013	0,9
24	АИР112МА6У	3,0	950	7,1	81,5	0,75	6,0	2,0	1,6	2,2	0,017	0,77

	3											
25	АИР112МВ6У3	4,0	950	9,2	82	0,81	6,0	2,0	1,6	2,2	0,021	0,87

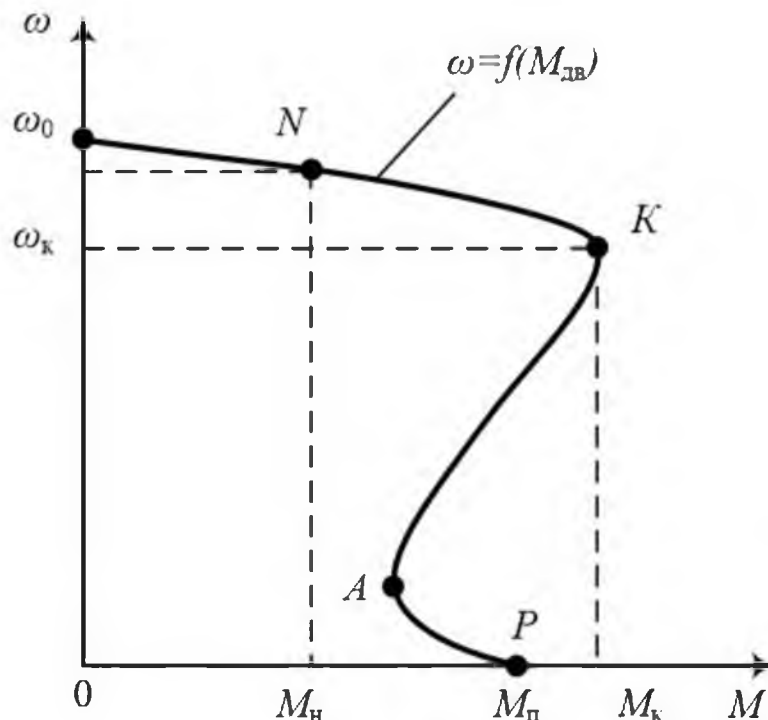


Рисунок 1 – Механічна характеристика трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором $\omega = f(M_{\text{дв}})$

де $M_{\text{к}}$ – максимальний момент, який розвиває електродвигун, Н·м;

$a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до

приведеного активного опору обмотки ротора, в.о.;

S – поточне ковзання, в.о.;

$S_{\text{к}}$ – критичне значення ковзання, в.о.

ВРАХОВУЮЧИ, ЩО $R_1 \approx R'_2$, ТО РІВНЯННЯ (1) ПРИЙМЕ ВИГЛЯД

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2S_{\text{к}}} \quad (2)$$

Рівняння механічної характеристики (1) відповідає більш-менш точним співвідношенням параметрів характеристики, тому що враховує падіння напруги на активному опорі статора R_1 . В реальних умовах активний опір статора (особливо для АД середньої та великої потужностей) незначний і ним (з достатньою для практичних розрахунків точністю) можна знехтувати

$$R_1 = 0. \quad (3)$$

З урахуванням (3) рівняння механічної характеристики (1) буде мати вигляд

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (4)$$

Рівняння (4) називається *спрощеною механічною характеристикою* АД в координатах S та M . Однак для двигунів великої потужності (де R_1 дуже мале) це рівняння досить точно відповідає фізичним процесам АД.

Якщо не вимагається висока точність, то механічну характеристику АД з короткозамкненим ротором в режимі двигуна можна побудувати за координатами п'яти характерних точок (рис. 1):

1 точка ідеального холостого ходу (синхронний режим) (точка ω_0) з координатами $\omega = \omega_0$, $(S = 0)$, $M_{\text{дв}} = 0$;

2 точка номінального режиму (точка N) з координатами: $\omega = \omega_n$, $(S = S_n)$, $M_{\text{дв}} = M_n$;

3 точка максимального моменту (критичний режим) (точка K) з координатами $\omega = \omega_k$, $(S = S_k)$, $M_{\text{дв}} = M_k = M_{\text{макс}}$;

4 точка мінімального моменту (точка A) з координатами: $\omega = \omega_{\text{мін}}$, $(S = S_{\text{мін}} = 0,8 \dots 0,85)$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{мін}}$;

5 точка короткого замикання (режим початкового пуску) (точка P) з координатами: $\omega = 0$, $(S = 1)$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{п}}$.

Координати характерних точок механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором розраховуються за каталоговими даними двигуна.

Перша точка – точка ідеального холостого ходу (синхронний режим): $\omega = \omega_0$, $(S = 0)$, $M_{\text{дв}} = 0$.

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (5)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (6)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Друга точка – точка номінального режиму: $\omega = \omega_{\text{н}}$, $(S = S_{\text{н}})$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$.
Номінальна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30}, \quad (7)$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (8)$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт.

Номінальне ковзання електродвигуна визначається за формулою

$$S_{\text{н}} = \frac{n_0 - n_{\text{н}}}{n_0}. \quad (9)$$

Третя точка – точка критичного моменту: $\omega = \omega_{\text{к}}$, $(S = S_{\text{к}})$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{к}}$.

Критичне ковзання визначається за формулою

$$S_{\text{к}} = S_{\text{н}} \cdot \frac{\mu_{\text{к}} + \sqrt{\mu_{\text{к}}^2 - 1 + 2 \cdot S_{\text{н}} \cdot (\mu_{\text{к}} - 1)}}{1 - 2 \cdot S_{\text{н}} \cdot (\mu_{\text{к}} - 1)}, \quad (10)$$

де $\mu_{\text{к}}$ – кратність максимального (критичного) моменту двигуна, в.о.

Кратність максимального моменту $\mu_{\text{к}} = M_{\text{к}} / M_{\text{н}}$ надається в каталогових даних і характеризує перевантажувальну здатність двигуна.

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{к}}). \quad (11)$$

Критичний (максимальний) момент визначається за формулою

$$M_{\text{к}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{к}}. \quad (12)$$

Четверта точка – точка мінімального моменту: $\omega = \omega_{\text{мін}}$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{мін}}$, $(S = S_{\text{мін}} = 0,8 \dots 0,85)$.

Мінімальна кутова швидкість, яка відповідає мінімальному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_{\text{мін}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{мін}}). \quad (13)$$

Мінімальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\min} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\min}, \quad (14)$$

де $\mu_{\min}$ – кратність мінімального моменту двигуна, в.о.

П'ята точка – точка пускового моменту: $\omega = 0$, $(S = 1)$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{п}}$.

Пусковий момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{п}}, \quad (15)$$

де $\mu_{\text{п}}$ – кратність пускового моменту двигуна, в.о.

У короткозамкнених двигунів величина початкового пускового моменту практично не завжди є найменшим значенням моменту в двигунному режимі. При малих кутових швидкостях ($S_{\min} = 0,8 \dots 0,85$) механічна характеристика асинхронного електродвигуна має провал внаслідок впливу асинхронних моментів від вищих непарних гармонік в магнітному полі обмоток. Це необхідно враховувати при пуску двигуна під навантаженням.

Оскільки момент асинхронного електродвигуна змінюється пропорційно квадрату напруги, то розрахувати характерні точки штучної механічної характеристики електродвигуна з урахуванням коефіцієнта зниження напруги можна за формулами

$$M'_{\text{к}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{к}} \cdot K_U^2; \quad (16)$$

$$M'_{\min} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\min} \cdot K_U^2; \quad (17)$$

$$M'_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{п}} \cdot K_U^2, \quad (18)$$

де K_U – коефіцієнт, що враховує зниження напруги мережі, в.о.

$$K_U = \frac{U_{\text{факт}}}{U_{\text{н}}}, \quad (19)$$

де $U_{\text{факт}}$ – фактична напруга мережі, В;

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга мережі, В.

Інші обертальні моменти електродвигуна розраховуються на основі формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S_{\text{і}}}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{і}}} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}}.$$

Перехід від ковзання S до кутової швидкості ω для будь-якої точки механічної характеристики виконується за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i). \quad (4.20)$$

Момент асинхронного електродвигуна з урахуванням коефіцієнта зниження напруги для будь-якої точки механічної характеристики розраховується за формулою

$$M'_i = M_i \cdot K_U^2. \quad (4.21)$$

Дані розрахунків природної $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та штучної $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ механічних характеристик звести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані розрахунків природної та штучної механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

S	0			$S_{\text{н}}$			$S_{\text{к}}$	$S_{\text{мін}}$	1,0
ω , рад/с	ω_0			$\omega_{\text{н}}$			$\omega_{\text{к}}$	$\omega_{\text{мін}}$	0
$M(U_{\text{н}})$, Н·м	0			$M_{\text{н}}$			$M_{\text{к}}$	$M_{\text{мін}}$	$M_{\text{п}}$
$M'(U_i)$, Н·м	0			$M'_{\text{н}}$			$M'_{\text{к}}$	$M'_{\text{мін}}$	$M'_{\text{п}}$

В прямокутній системі координат побудувати механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при номінальній напрузі $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та зниженій напрузі мережі $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ (рисунок 2).

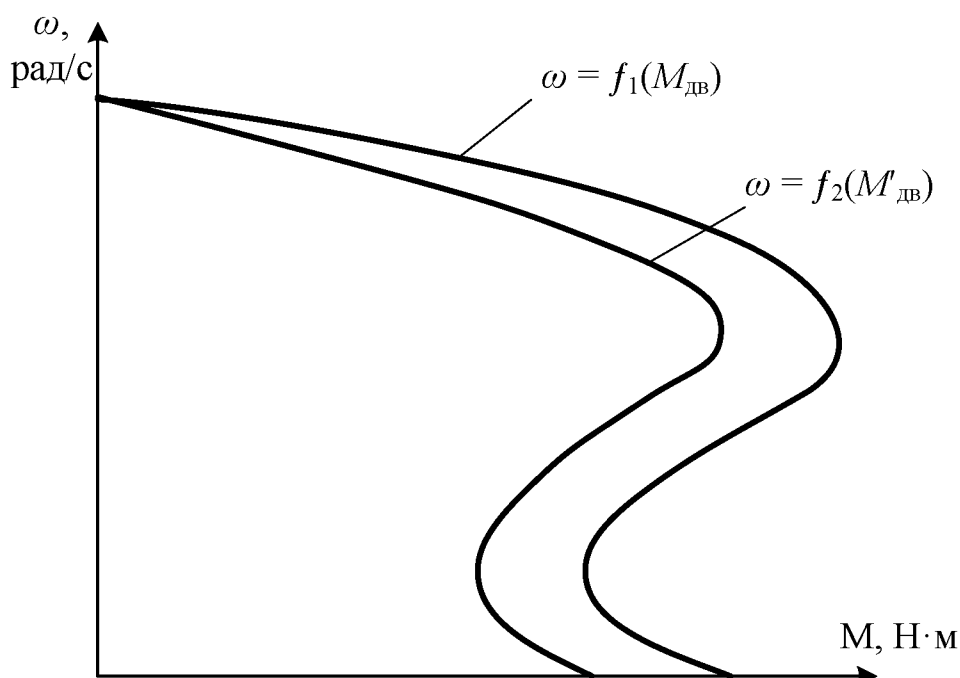


Рисунок 2 – Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній та зниженій напрузі мережі

4 Приклад розрахунку

Для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором типу 5А80МВ6 розрахувати і побудувати природну та штучну (при зниженій напрузі мережі) механічні характеристики.

Каталогові дані АД з короткозамкненим ротором:

$$\begin{aligned} P_{\text{н}} &= 1,1 \text{ кВт}; & U_{\text{н}} &= 380 \text{ В}; & I_{\text{н}} &= 3,3 \text{ А}; & n_{\text{н}} &= 930 \text{ об/хв.}; \\ \eta_{\text{н}} &= 72 \%; & \cos\varphi_{\text{н}} &= 0,7; & K_i &= 4,5; & J_{\text{дв}} &= 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \\ \mu_{\text{п}} &= 2,0; & \mu_{\text{мін}} &= 1,6; & \mu_{\text{к}} &= 2,4; & K_U &= 0,9; & m &= 16 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Розрахунок механічної характеристики асинхронного двигуна проводимо на основі уточненої формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}},$$

де $M_{\text{к}}$ – критичний (максимальний) момент, який розвиває двигун, Н·м;

$a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до

приведеного активного опору обмотки ротора, в.о.

S – поточне ковзання, в.о.;

$S_{\text{к}}$ – критичне значення ковзання, в.о.

Для побудови природної механічної характеристики електродвигуна (рисунок 3) розраховуємо п'ять характерних точок

Перша точка – точка ідеального холостого ходу (синхронний режим):
 $\omega = \omega_0$, ($S = 0$), $M_{\text{дв}} = 0$.

Визначаємо синхронну кутову швидкість

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для АД з короткозамкненим ротором типу 5А80МВ6 $p = 3$. Тоді

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Друга точка – точка номінального режиму: $\omega = \omega_n$, $(S = S_n)$, $M_{дв} = M_n$.
Визначаємо номінальну кутову швидкість

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30},$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 930}{30} = 97,3 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо номінальний момент електродвигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, Вт.

$$M_n = \frac{1,1 \cdot 10^3}{97,3} = 11,31 \text{ Н·м.}$$

Визначаємо номінальне ковзання електродвигуна

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0};$$

$$S_n = \frac{1000 - 930}{1000} = 0,07.$$

Визначаємо номінальний момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі мережі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_n = M_n \cdot K_U^2;$$

$$M'_n = 11,31 \cdot 0,9^2 = 9,16 \text{ Н·м.}$$

Третя точка – точка критичного моменту: $\omega = \omega_k$, $(S = S_k)$, $M_{дв} = M_k$.
Визначаємо критичне ковзання

$$S_k = S_H \cdot \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2 \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)},$$

де μ_k – кратність максимального (критичного) моменту двигуна, в.о.

$$S_k = 0,07 \cdot \frac{2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1 + 2 \cdot 0,07 \cdot (2,4 - 1)}}{1 - 2 \cdot 0,07 \cdot (2,4 - 1)} = 0,4.$$

Визначаємо критичну кутову швидкість, яка відповідає критичному ковзанню

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - S_k);$$

$$\omega_k = 104,7 \cdot (1 - 0,4) = 62,82 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо критичний (максимальний) момент електродвигуна

$$M_k = M_H \cdot \mu_k;$$

$$M_k = 11,31 \cdot 2,4 = 27,14 \text{ Н·м.}$$

Визначаємо критичний момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_k = M_H \cdot \mu_k \cdot K_U^2 = M_k \cdot K_U^2;$$

$$M'_k = 11,31 \cdot 2,4 \cdot 0,9^2 = 27,14 \cdot 0,9^2 = 21,99 \text{ Н·м.}$$

Четверта точка – точка мінімального моменту: $\omega = \omega_{\min}$, $M_{дв} = M_{\min}$,
($S = S_{\min} = 0,8 \dots 0,85$).

Визначаємо мінімальну кутову швидкість, яка відповідає мінімальному ковзанню

$$\omega_{\min} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\min});$$

$$\omega_{\min} = 104,7 \cdot (1 - 0,85) = 15,71 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо мінімальний момент електродвигуна

$$M_{\min} = M_H \cdot \mu_{\min},$$

де $\mu_{\text{мін}}$ – кратність мінімального моменту двигуна, в.о.

$$M_{\text{мін}} = 11,31 \cdot 1,6 = 18,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо мінімальний момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_{\text{мін}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{мін}} \cdot K_U^2 = M_{\text{мін}} \cdot K_U^2;$$

$$M'_{\text{мін}} = 11,31 \cdot 1,6 \cdot 0,9^2 = 18,1 \cdot 0,9^2 = 14,66 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

П'ята точка – точка пускового моменту: $\omega = 0$, ($S = 1$), $M_{\text{дв}} = M_{\text{п}}$.

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{п}},$$

де $\mu_{\text{п}}$ – кратність пускового моменту двигуна, в.о.

$$M_{\text{п}} = 11,31 \cdot 2,0 = 22,62 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо пусковий момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{п}} \cdot K_U^2 = M_{\text{п}} \cdot K_U^2;$$

$$M'_{\text{п}} = 11,31 \cdot 2,0 \cdot 0,9^2 = 22,62 \cdot 0,9^2 = 18,32 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахунки природної та штучної (при зниженій напрузі) механічних характеристик АД з короткозамкненим ротором зводимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Розрахункові дані природної та штучної механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

S , в.о.	0	$S_{\text{н}}$ 0,07	0,1	0,2	0,3	$S_{\text{к}}$ 0,4	0,6	$S_{\text{мін}}$ 0,85	1,0
ω , рад/с	ω_0 104,7	$\omega_{\text{н}}$ 97,3	94,23	83,76	73,29	$\omega_{\text{к}}$ 62,82	41,88	$\omega_{\text{мін}}$ 15,71	0
$M(U_{\text{н}})$, Н·м	0	$M_{\text{н}}$ 11,31	15,05	23,03	26,36	$M_{\text{к}}$ 27,14	24,35	$M_{\text{мін}}$ 18,1	$M_{\text{п}}$ 22,62
$M'(U_i)$, Н·м	0	$M'_{\text{н}}$ 9,16	12,2	18,65	21,35	$M'_{\text{к}}$ 21,99	19,72	$M'_{\text{мін}}$ 14,66	$M'_{\text{п}}$ 18,32

В прямокутній системі координат за даними таблиці 3 будуємо природну $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та штучну $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором (рисунок 3).

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

1. Варіант індивідуального завдання.
2. Розрахункові формули.
3. Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та зниженій напрузі $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$.
4. Аналіз отриманих результатів.

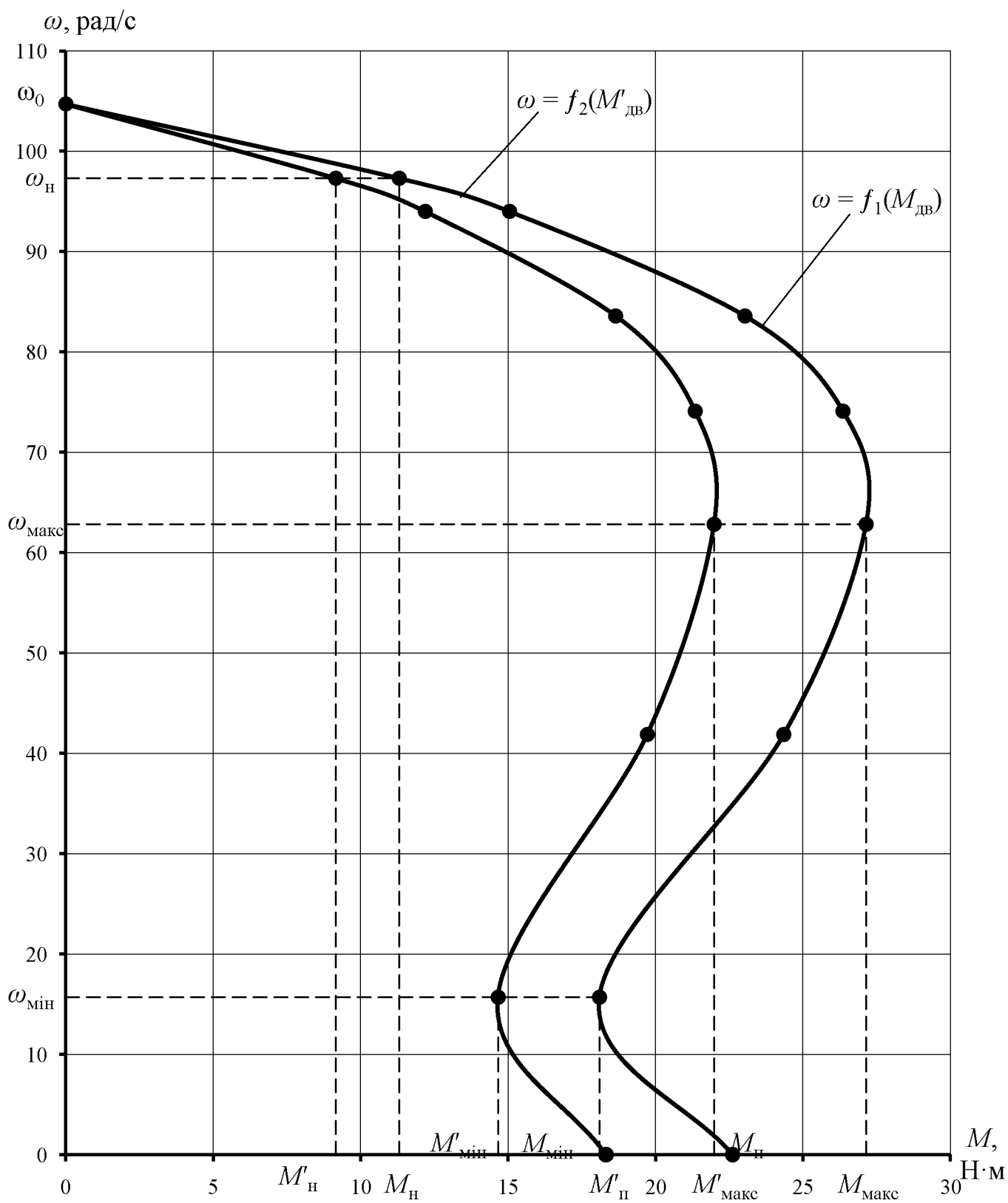


Рисунок 3 – Природна та штучна механічні характеристики АД при номінальній та зниженій напрузі мережі

6 Контрольні питання

- 1 Які технічні дані асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором наводяться в його паспортних даних?
- 2 Що називається електро механічною та механічною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 3 Що називається природною та штучною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 4 Які припущення допускаються при виведенні рівняння механічної характеристики асинхронного електродвигуна?
- 5 Як визначається синхронна кутова швидкість АД?
- 6 Як за каталоговими даними визначити номінальний момент на валу електродвигуна?
- 7 Як за каталоговими даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?
- 8 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна? Як воно пов'язане зі швидкістю ротора і як його визначити?
- 9 Що таке критичне ковзання асинхронного двигуна і від чого воно залежить?
- 10 Як за каталожними даними визначити пусковий момент асинхронного електродвигуна?
- 11 Що таке максимальний момент та яким чином його можна розраховувати за каталоговими даними?
- 12 Як за каталоговими даними визначити мінімальний момент асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором?
- 13 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні?
- 14 Як розраховувати поточне значення моменту для побудови механічних характеристик?
- 15 Як залежать моменти асинхронного електродвигуна (номінальний, мінімальний, максимальний, пусковий) від величини підведеної до нього напруги?
- 16 За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором?

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ РОЗГОНУ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРОДВИГУН – РОБОЧА МАШИНА» МЕТОДОМ ГРАФО-АНАЛІТИЧНОГО ІНТЕГРУВАННЯ РІВНЯННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» (ЕД-РМ) методом графо-аналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 113-121; 2, с. 133-140; 5, с. 45-48].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» (ЕД-РМ) методом графо-аналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу.

1.3 Ознайомитися з методикою розрахунку механічних характеристик виробничих машин.

1.4 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для розрахунку часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» використати механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній напрузі живлення $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$, а також з урахуванням зниження напруги мережі від номінальної $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$, які були розраховані і побудовані в практичній роботі «Розрахунок механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором».

2.2 Розрахувати і побудувати механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_c)$.

2.3 Визначити час розгону системи «електродвигун-робоча машина» методом графо-аналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу шляхом побудови залежності $\omega = f_4(M_{\text{дин}})$ при номінальній напрузі живлення та $\omega = f_5(M'_{\text{дин}})$ з урахуванням зниження напруги мережі.

3 Загальні відомості і рекомендації

При розрахунку електроприводів потрібно знати час пуску або гальмування системи електродвигун – робоча машина. Така необхідність виникає при розробці технологічних процесів, пов'язаних з частими пусками, гальмуванням і реверсуванням електродвигунів; при перевірці двигунів на нагрівання під час перехідних режимів тощо. У тих випадках, коли аналітичний розв'язок занадто складний або неможливий через відсутність точного рівняння

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електродвигуна	$P_{\text{н}},$ кВт	$n_{\text{н дв}},$ об/хв.	$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{мін}}$	$\mu_{\text{макс}}$	$J_{\text{дв}},$ кг·м ²	$M_0,$ Н·м	$M_{0\text{н}},$ Н·м	$n_{\text{н рм}},$ об/хв.	$\eta_{\text{пер}},$ в.о.	$J_{\text{рм}},$ кг·м ²	x	$\Delta U,$ %
1	АИР80А2У3	1,5	2850	2,1	1,6	2,2	0,0018	1,0	10,0	950	0,95	0,12	1,3	25
2	АИР80В2У3	2,2	2850	2,0	1,6	2,2	0,0021	3,0	15,0	1425	0,93	0,1	2,1	20
3	АИР71А2У3	0,75	2820	2,1	1,6	2,2	0,00097	0,8	9,2	1320	0,97	0,045	1,6	15
4	АИР71В2У3	1,1	2800	2,1	1,6	2,2	0,0011	1,4	7,0	1405	0,93	0,03	1,5	22
5	АИР90L2У3	3,0	2850	2,0	1,6	2,2	0,0035	5,0	30,0	947	0,95	0,1	1,2	13
6	АИР100S2У3	4,0	2850	2,0	1,6	2,2	0,0059	6,0	27,0	1420	0,94	0,07	2,0	12
7	АИР100L2У3	5,5	2850	2,0	1,6	2,2	0,0075	7,0	35,0	1440	0,96	0,09	1,7	24
8	АИР160M2У3	18,5	2910	2,0	1,8	2,7	0,043	20,0	90,0	1450	0,93	0,22	2,0	15
9	АИР132M2У3	11,0	2910	1,6	1,2	2,2	0,023	12,0	65,0	1395	0,97	0,005	2,1	14
10	АИР160S2У3	15,0	2910	1,8	1,7	2,7	0,039	8,0	105,0	730	0,94	0,19	2,3	23
11	АИР80А4У3	1,1	1395	2,2	1,6	2,2	0,0032	2,5	14,0	740	0,98	0,06	1,2	10
12	АИР80В4У3	1,5	1395	2,2	1,6	2,2	0,0033	4,0	35,0	400	0,97	0,09	2,1	11
13	АИР90L4У3	2,2	1400	2,1	1,6	2,2	0,0056	5,0	28,0	710	0,98	0,1	1,7	25

Продовження таблиці 1

Варіант	Тип електродвигуна	$P_{\text{н}},$ кВт	$n_{\text{н дв}},$ об/хв.	$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{мін}}$	$\mu_{\text{макс}}$	$J_{\text{дв}},$ кг·м ²	$M_0,$ Н·м	$M_{0\text{н}},$ Н·м	$n_{\text{н рм}},$ об/хв.	$\eta_{\text{пер}},$ в.о.	$J_{\text{рм}},$ кг·м ²	x	$\Delta U,$ %
14	АИР100S4У3	3,0	1410	2,0	1,6	2,2	0,0087	12,0	60,0	480	0,96	0,16	2,3	13
15	АИР100L4У3	4,0	1410	2,0	1,6	2,2	0,011	10,0	55,0	715	0,96	0,4	1,5	19
16	АИР112М4У3	5,5	1430	2,0	1,6	2,2	0,017	15,0	72,0	722	0,97	0,5	2,0	21
17	АИР160S4У3	15,0	1455	1,9	1,8	2,9	0,078	30,0	300,0	580	0,97	1,2	1,2	10
18	АИР160М4У3	18,5	1455	1,9	1,8	2,9	0,100	50,0	250,0	730	0,95	1,2	2,0	12
19	АИР160S6У3	11,0	970	2,0	1,6	2,7	0,120	40,0	180,0	450	0,95	0,09	2,0	22
20	АИР160М6У3	15,0	970	2,0	1,6	2,7	0,150	30,0	150,0	500	0,97	0,1	1,0	25
21	АИР80В6У3	1,1	920	2,0	1,6	2,2	0,0046	4,0	44,0	230	0,92	0,6	1,5	18
22	АИР90L6У3	1,5	925	2,0	1,6	2,2	0,0073	5,0	45,0	312	0,95	0,5	1,4	11
23	АИР100L6У3	2,2	945	2,0	1,6	2,2	0,013	10,0	95,0	238	0,96	1,2	1,4	10
24	АИР112МА6У3	3,0	950	2,0	1,6	2,2	0,017	8,0	61,0	472	0,97	0,9	2,1	23
25	АИР112МВ6У	4,0	950	2,0	1,6	2,2	0,021	10,0	80,0	420	0,96	10,0	1,1	13

механічної характеристики (наприклад, у АД з короткозамкненим ротором), час пуску визначають графічним або графо-аналітичним методами.

Вихідними даними для розрахунку є:

- механічна характеристика електродвигуна $\omega = f(M_{\text{дв}})$;
- механічна характеристика виробничого механізму, зведена до вала електродвигуна $\omega = f(M_c)$;
- зведений до вала електродвигуна момент інерції системи електродвигун – робоча машина $J_{\text{зв}}$.

Механічною характеристикою електродвигуна оберտального руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M_{\text{дв}})$.

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту статичних опорів від кутової швидкості її приводного вала $\omega = f(M_c)$.

Зведену до вала електродвигуна механічну характеристику робочої машини розраховують за рівнянням Бланка

$$M_c = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{н}}} \right)^x, \quad (1)$$

де M_c – момент опору при швидкості ω ,

M_0 – момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення), який не залежить від швидкості, Н·м;

$M_{\text{сн}}$ – момент опору при номінальній швидкості $\omega_{\text{н}}$, Н·м;

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

ω_i – поточне значення кутової швидкості, рад/с;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Приведений до валу електродвигуна номінальний момент опору робочої машини, $M_{\text{сн}}$, Н·м, визначається за формулою

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{0\text{н}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}}, \quad (2)$$

де $M_{0\text{н}}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

i – передаточне число механізму, в.о.;

$\eta_{\text{пер}}$ – коефіцієнт корисної дії передачі, в.о.

Передаточне число механізму, i , в.о., визначається за формулою

$$i = \frac{n_{\text{ндв}}}{n_{\text{нрм}}}, \quad (3)$$

де $n_{\text{нрм}}$ – номінальна частота обертання робочої машини, об/хв.

У разі відсутності даних про момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення робочої машини) M_0 , Н·м, його можна прийняти рівним

$$M_0 = (0,1 \dots 0,3) \cdot M_{\text{сн}}. \quad (4)$$

Задаючи значення ω від 0 до ω_0 розраховують залежність $\omega = f_3(M_{\text{с}})$. Результати розрахунків зручно звести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані розрахунку механічної характеристики робочої машини

ω , рад/с	0								ω_0
$M_{\text{с}}$, Н·м									

На основі розрахункових даних таблиці 2 будують механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_{\text{с}})$ на тому ж графіку, що і механічні характеристики електродвигуна при номінальній $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та зниженій $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ напрузі мережі.

Для визначення часу пуску двигуна графічно знаходять різницю $M_{\text{дин}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}$ та $M'_{\text{дин}} = M'_{\text{дв}} - M_{\text{с}}$ і будують графік динамічного моменту при номінальній напрузі мережі $\omega = f_4(M_{\text{дин}})$ та з урахуванням зниження напруги мережі $\omega = f_5(M'_{\text{дин}})$.

Графіки $\omega = f_4(M_{\text{дин}})$ та $\omega = f_5(M'_{\text{дин}})$ поділяють на окремі ділянки через довільні проміжки кутової швидкості $\Delta\omega$ і знаходять середнє значення динамічного моменту $M_{\text{дин сер}}$ та $M'_{\text{дин сер}}$ на кожній ділянці. Значення $\Delta\omega$ вибирають такими, щоб забезпечити достатню точність визначення $M_{\text{дин сер}}$ при номінальній напрузі та $M'_{\text{дин сер}}$ з урахуванням зниження напруги мережі.

Час пуску приводу на кожній ділянці визначається за виразом

$$\Delta t_i = J_{\text{зв}} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{дин сер } i}}, \quad (5)$$

де $\Delta\omega_i$ – приріст кутової швидкості на i -й ділянці, рад/с;

$M_{\text{дин сер } i}$ – середнє значення динамічного моменту на i -й ділянці, Н·м.

Зведений до вала двигуна момент інерції $J_{\text{зв}}$, кг·м², частин електроприводу, що рухаються, дорівнює

$$J_{\text{зв}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{пер}} + \frac{J_{\text{рм}}}{i^2}, \quad (6)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції ротора електродвигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 $J_{\text{пер}}$ – момент інерції передачі, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 $J_{\text{рм}}$ – момент інерції робочої машини, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 i – передаточне число механізму.
Момент інерції передачі, $J_{\text{пер}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, приймається рівним

$$J_{\text{пер}} = 0,2 \cdot J_{\text{дв}}.$$

Знаючи тривалість розгону на кожній ділянці, загальний час пуску системи «електродвигун-робоча машина» визначається за виразом

$$t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i.$$

Результати розрахунків зручно звести до таблиці 3 та таблиці 4.

Таблиця 3 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» при номінальній напрузі мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\omega_{\text{поч}}$, рад/с												
$\omega_{\text{кін}}$, рад/с												
$\Delta\omega$, рад/с												
$M_{\text{дин сер } i} (U_{\text{н}})$, Н·м												
$\Delta t_i (U_{\text{н}})$, с												
$t_{\text{п}} (U_{\text{н}})$, с												

Таблиця 4 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» з урахуванням зниження напруги мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\omega_{\text{поч}}$, рад/с												
$\omega_{\text{кін}}$, рад/с												
$\Delta\omega$, рад/с												
$M'_{\text{дин сер } i} (U_i)$, Н·м												
$\Delta t_i (U_i)$, с												
$t_{\text{п}} (U_i)$, с												

4 Приклад розрахунку

Визначити час розгону системи «електродвигун-робоча машина» методом графо-аналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу.

Паспортні дані робочої машини:

$$M_0 = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{0\text{н}} = 4,0 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad n_{\text{н}} = 935 \text{ об/хв.};$$

$$\eta_{\text{пер}} = 0,97; \quad J_{\text{рм}} = 0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \quad x = 2.$$

Технічні дані електродвигуна 5А80МВ6 приведені в практичній роботі «Розрахунок механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором».

Каталожні дані АД:

$$P_{\text{н}} = 1,1 \text{ кВт}; \quad U_{\text{н}} = 380 \text{ В}; \quad I_{\text{н}} = 3,3 \text{ А}; \quad n_{\text{н}} = 930 \text{ об/хв.}$$

$$\eta_{\text{н}} = 72\%; \quad \cos\varphi_{\text{н}} = 0,7 \quad K_i = 4,5; \quad J_{\text{дв}} = 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$\mu_{\text{п}} = 2,0; \quad \mu_{\text{мін}} = 1,6; \quad \mu_{\text{к}} = 2,4; \quad K_U = 0,9; \quad m = 16 \text{ кг.}$$

Механічну характеристику робочої машини розраховуємо за рівнянням Бланка

$$M_{\text{с}} = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{н}}} \right)^x,$$

де $M_{\text{с}}$ – момент опору при швидкості ω ,

M_0 – момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення), який не залежить від швидкості, Н·м;

$M_{\text{сн}}$ – момент опору при номінальній швидкості $\omega_{\text{н}}$, Н·м;

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

ω_i – поточне значення кутової швидкості, рад/с;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Приведений до валу електродвигуна номінальний момент опору робочої машини, $M_{\text{сн}}$, Н·м, визначається за формулою

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{0\text{н}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}},$$

де $M_{0\text{н}}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

i – передаточне число механізму, в.о.;

$\eta_{\text{пер}}$ – коефіцієнт корисної дії передачі, в.о.

Передаточне число механізму, i , в.о., визначається за формулою

$$i = \frac{n_{\text{ндв}}}{n_{\text{нрм}}},$$

де $n_{\text{нрм}}$ – номінальна частота обертання робочої машини, об/хв.

$$i = \frac{930}{935} = 0,99;$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{4,0}{0,99 \cdot 0,97} = 4,17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо синхронну кутову швидкість робочої машини

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів.

Для АД з короткозамкненим ротором типу 5А80МВ6 $p = 3$. Тоді

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с}.$$

Визначаємо номінальну кутову швидкість електродвигуна

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30},$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3,14 \cdot 930}{30} = 97,3 \text{ рад/с}.$$

Механічну характеристику робочої машини визначаємо за рівнянням

$$M_{\text{с}} = 0,8 + (4,17 - 0,8) \cdot \left(\frac{\omega_i}{97,34} \right)^2,$$

задаючи значення кутової швидкості ω від 0 до ω_0 та розраховуємо залежність $\omega = f_3(M_{\text{с}})$.

Результати розрахунків зводимо до таблиці 5.

Таблиця 5 – Дані розрахунку механічної характеристики робочої машини

ω , рад/с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	104,7
M_c , Н·м	0,80	0,84	0,94	1,12	1,37	1,69	2,08	2,54	3,08	3,68	4,35	4,70

На основі розрахункових даних будуємо механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_c)$ на тому ж графіку, що і механічні характеристики електродвигуна при номінальній напрузі мережі $\omega = f_1(M_{дв})$ та з урахуванням зниження напруги мережі $\omega = f_2(M'_{дв})$.

Для визначення часу пуску двигуна графічно знаходимо різницю $M_{дин} = M_{дв} - M_c$ та $M'_{дин} = M'_{дв} - M_c$ і будуємо графік динамічного моменту при номінальній напрузі мережі $\omega = f_4(M_{дин})$ (рисунок 1) та з урахуванням зниження напруги мережі $\omega = f_5(M'_{дин})$ (рисунок 2).

Графіки $\omega = f_4(M_{дин})$ та $\omega = f_5(M'_{дин})$ поділяємо на окремі ділянки через довільні проміжки кутової швидкості $\Delta\omega$ і знаходимо середнє значення динамічного моменту $M_{дин\text{сер}}$ та $M'_{дин\text{сер}}$ на кожній ділянці. Значення $\Delta\omega$ вибираємо такими, щоб забезпечити достатню точність визначення $M_{дин\text{сер}}$ при номінальній напрузі та $M'_{дин\text{сер}}$ з урахуванням зниження напруги мережі.

Час пуску приводу на кожній ділянці при номінальній напрузі та з урахуванням зниження напруги визначаємо за виразами

$$\Delta t_i = J_{зв} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{дин\text{сер}i}};$$

$$\Delta t'_i = J_{зв} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M'_{дин\text{сер}i}},$$

де $\Delta\omega_i$ – приріст кутової швидкості на i -й ділянці, рад/с;

$M_{дин\text{сер}i}$, $M'_{дин\text{сер}i}$ – відповідно середнє значення динамічного моменту на i -й ділянці при номінальній та зниженій напрузі мережі, Н·м.

Зведений до вала двигуна момент інерції $J_{зв}$, кг·м², частин електроприводу, що рухаються, дорівнює

$$J_{зв} = J_{дв} + J_{пер} + \frac{J_{рм}}{i^2},$$

де $J_{дв}$ – момент інерції ротора обраного електродвигуна, кг·м²;

$J_{пер}$ – момент інерції передачі, кг·м²;

J_{pm} – момент інерції робочої машини, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

i – передаточне число механізму.

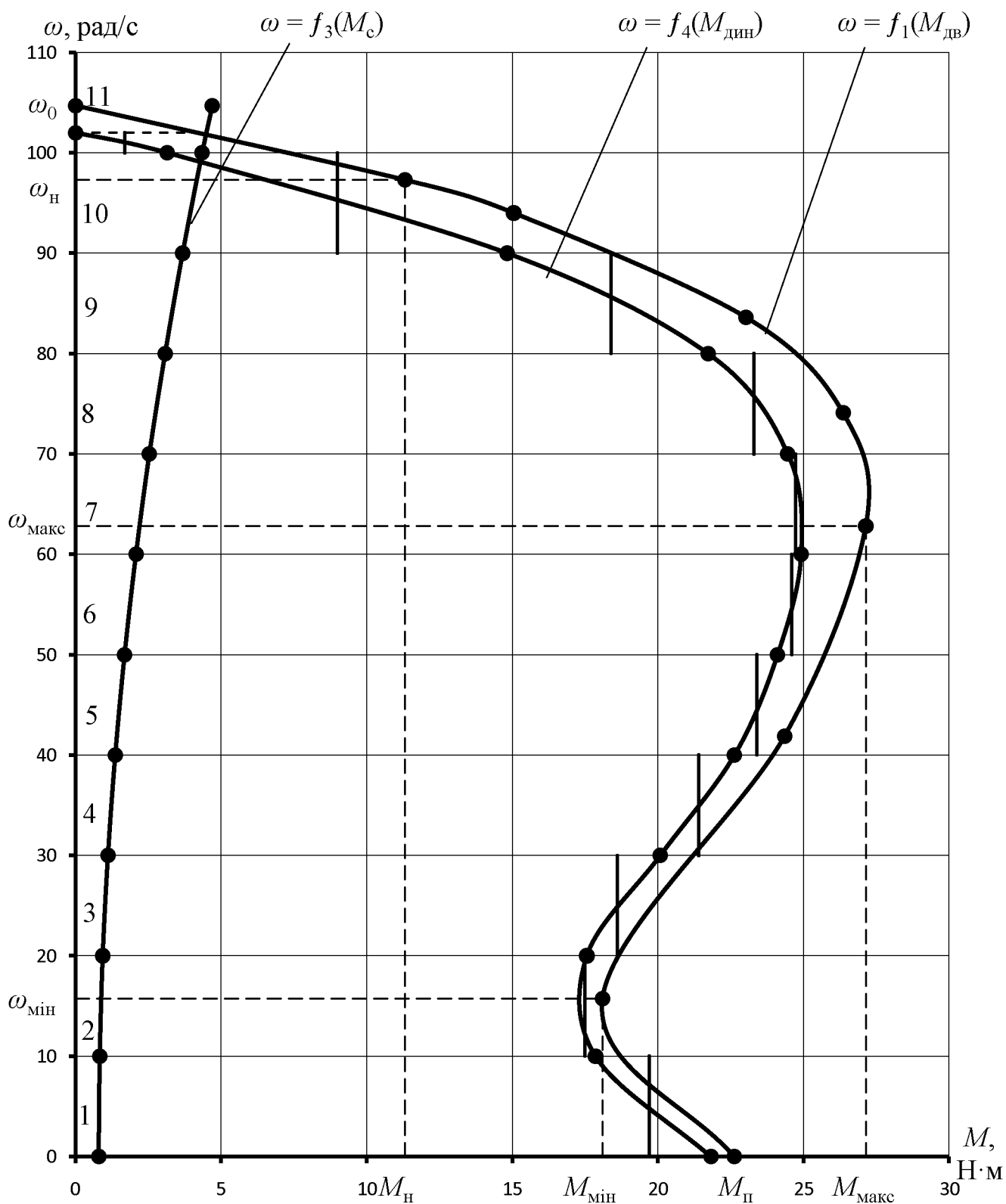


Рисунок 1 – Механічна характеристика електродвигуна і робочої машини для визначення динамічного моменту при номінальній напрузі

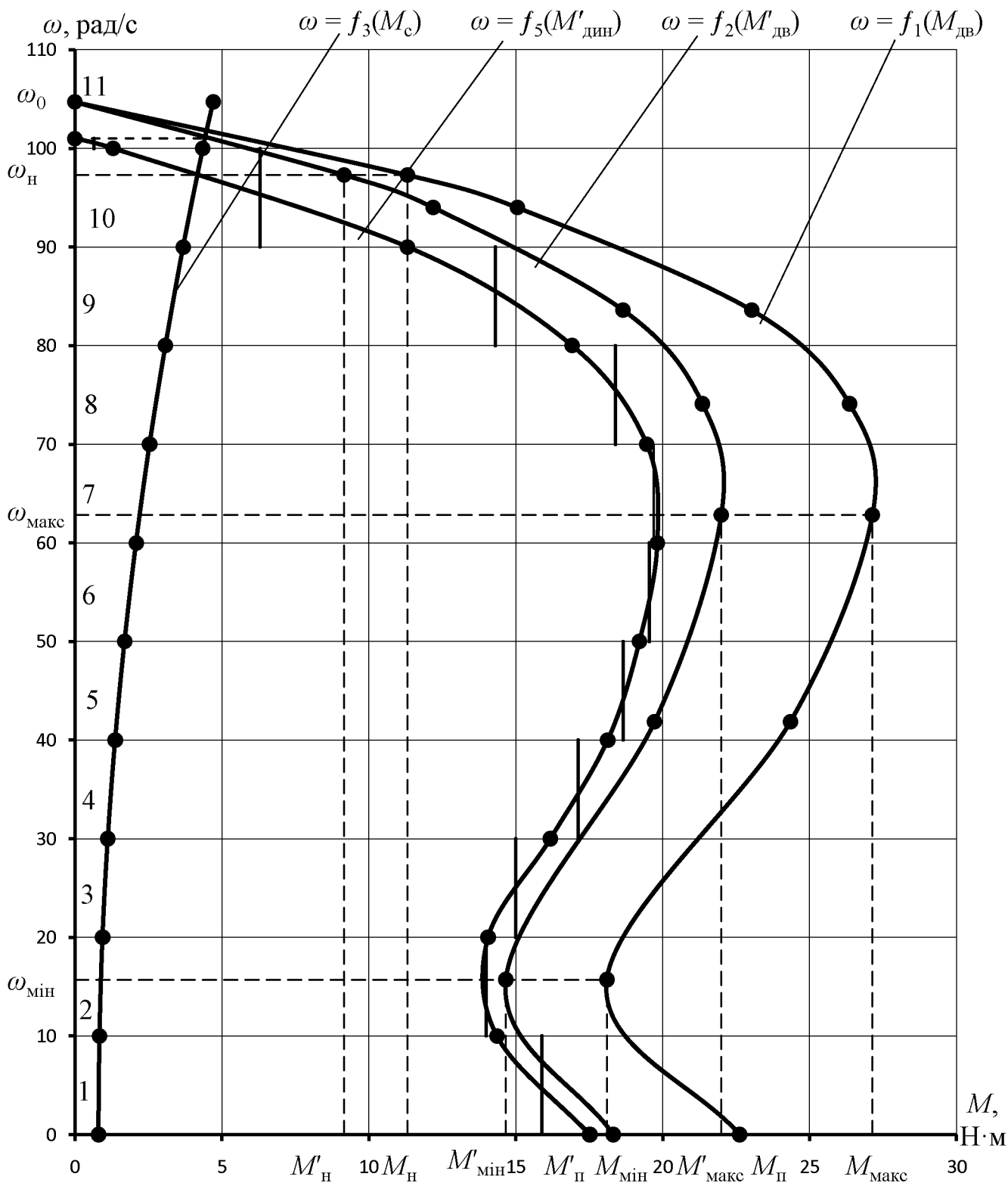


Рисунок 2 – Механічна характеристика електродвигуна і робочої машини для визначення динамічного моменту з урахуванням зниження напруги

Момент інерції передачі, $J_{пер}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, приймаємо рівним

$$J_{пер} = 0,2 \cdot J_{дв}.$$

Згідно каталожних даних $J_{\text{дв}} = 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_{\text{рм}} = 0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Отже

$$J_{\text{пер}} = 0,2 \cdot 0,0048 = 0,00096 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 ;$$

$$J_{\text{зв}} = 0,0048 + 0,00096 + \frac{0,01}{0,99^2} = 0,016 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 .$$

Знаючи тривалість розгону на кожній ділянці, загальний час пуску системи «електродвигун-робоча машина» визначаємо за виразом

$$t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i ;$$

$$t'_{\text{п}}(U_i) = \sum_{i=1}^n \Delta t'_i(U_i) .$$

Результати розрахунків часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» зводимо до таблиць 6 та 7.

Таблиця 6 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» при номінальній напрузі мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5
$\omega_{\text{поч}}, \text{ рад/с}$	0	10	20	30	40
$\omega_{\text{кін}}, \text{ рад/с}$	10	20	30	40	50
$\Delta\omega, \text{ рад/с}$	10	10	10	10	10
$M_{\text{дин сер } i}(U_{\text{н}}), \text{ Н}\cdot\text{м}$	19,7	17,5	18,6	21,4	23,4
$\Delta t_i(U_{\text{н}}), \text{ с}$	0,0081	0,0091	0,0086	0,0075	0,0068
$t_{\text{п}}(U_{\text{н}}), \text{ с}$	0,0081	0,0172	0,0258	0,0333	0,0401

Продовження таблиці 6

№ ділянки	6	7	8	9	10	11
$\omega_{\text{поч}}, \text{ рад/с}$	50	60	70	80	90	100
$\omega_{\text{кін}}, \text{ рад/с}$	60	70	80	90	100	102
$\Delta\omega, \text{ рад/с}$	10	10	10	10	10	2
$M_{\text{дин сер } i}(U_{\text{н}}), \text{ Н}\cdot\text{м}$	24,6	24,7	23,3	18,4	9	1,7
$\Delta t_i(U_{\text{н}}), \text{ с}$	0,0065	0,0065	0,0069	0,0087	0,0178	0,0188

$t_{\Pi} (U_{\Pi}), \text{с}$	0,0466	0,0531	0,0600	0,0687	0,0865	0,1053
-------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Таблиця 7 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» з урахуванням зниження напруги

№ ділянки	1	2	3	4	5
$\omega_{\text{поч}}, \text{рад/с}$	0	10	20	30	40
$\omega_{\text{кін}}, \text{рад/с}$	10	20	30	40	50
$\Delta\omega, \text{рад/с}$	10	10	10	10	10
$M'_{\text{дин сер } i} (U_i), \text{Н}\cdot\text{м}$	15,9	14,0	15,0	17,1	18,6
$\Delta t_i (U_i), \text{с}$	0,0101	0,0114	0,0107	0,0094	0,0086
$t_{\Pi} (U_i), \text{с}$	0,0101	0,0215	0,0322	0,0416	0,0502

Продовження таблиці 7

№ ділянки	6	7	8	9	10	11
$\omega_{\text{поч}}, \text{рад/с}$	50	60	70	80	90	100
$\omega_{\text{кін}}, \text{рад/с}$	60	70	80	90	100	101
$\Delta\omega, \text{рад/с}$	10	10	10	10	10	1
$M'_{\text{дин сер } i} (U_i), \text{Н}\cdot\text{м}$	19,5	19,7	18,4	14,3	6,3	0,65
$\Delta t_i (U_i), \text{с}$	0,0082	0,0081	0,0087	0,0112	0,0254	0,2462
$t_{\Pi} (U_i), \text{с}$	0,0584	0,0665	0,0752	0,0864	0,1118	0,358

Отже, час пуску системи «електродвигун – робоча машина» при номінальній напрузі мережі дорівнює

$$t_{\Pi} = 0,1053 \text{ с},$$

а з урахуванням зниження напруги мережі

$$t_{\Pi} (U_i) = 0,358 \text{ с}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

1. Варіант індивідуального завдання.
2. Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
3. Таблиці з результатами розрахунків.
4. Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та зниженій напрузі мережі $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$.
5. Механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_c)$.
6. Залежності $\omega = f_4(M_{\text{дин}})$ при номінальній напрузі та $\omega = f_5(M'_{\text{дин}})$ з

урахуванням зниження напруги мережі.

7. Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

1 Які процеси в електромеханічній системі відносять до перехідних?

2 Які види інерції діють в системах електропривод – робоча машина?

3 Навіщо потрібно знати час пуску (гальмування) системи електродвигун – робоча машина?

4 На основі якого рівняння визначається час перехідного процесу при зміні швидкості електродвигуна?

5 Яку залежність називають механічною характеристикою електродвигуна?

6 Яку залежність називають механічною характеристикою робочої машини?

7 Якою емпіричною формулою описують механічну характеристику виробничого механізму, проаналізуйте її?

8 За якою ознакою класифікують механічні характеристики виконавчих органів робочих машин і на які групи їх можна поділити?

9 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = 0$?

10 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = 1$?

11 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = 2$?

12 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = -1$?

13 Наведіть основне рівняння руху електроприводу і проаналізуйте його.

14 Що називається моментом інерції?

15 За яким рівнянням визначають час пуску системи електродвигун-робоча машина?

16 Чому доводиться визначати час пуску системи електродвигун-робоча машина графо-аналітичним методом?

17 Які вихідні дані необхідні для визначення часу пуску системи електродвигун-робоча машина графо-аналітичним методом?

18 Яка послідовність розрахунку тривалості пуску електродвигуна графо-аналітичним методом?

19 Як будується залежність динамічного моменту від кутової швидкості?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЧАСТОТОЮ СТРУМУ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в приводі різних виробничих машин при частотному регулюванні кутової швидкості.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 192-200].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в приводі різних виробничих машин при частотному регулюванні кутової швидкості.

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Визначити для заданого електродвигуна номінальний момент M_n , критичний момент M_k , номінальну кутову швидкість ω_n , критичне ковзання S_k , критичну кутову швидкість ω_k .

2.2 Розрахувати та побудувати природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

2.3 Розрахувати штучні механічні характеристики АД приводу підйомника, генератора постійного струму з незалежним збудженням, насоса та фрезерного верстата при частоті струму $f_{1.1} = 40$ Гц та $f_{1.2} = 60$ Гц.

2.4 Побудувати на одному графіку природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна, що застосовується в приводі підйомника, генератора постійного струму з незалежним збудженням, насоса та фрезерного верстата при регулюванні швидкості обертання електродвигуна частотою струму.

3 Загальні відомості і рекомендації

Найбільш широке розповсюдження одержали наступні способи регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів (АД):

- за допомогою резисторів у колах ротора і статора;
- зміною числа пар полюсів;

- зміною величини напруги живлення статора;
- частотне регулювання.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номінальна потужність, P_H , кВт	Номінальне ковзання, S_H , %	Кратність критичного моменту, μ_K , в.о.
1	АИР132М2	11	3,0	2,2
2	АИР160S2	15	3,0	2,7
3	АИР160М2	18,5	3,0	2,7
4	АИР180S2	22	2,7	2,7
5	АИР180М2	30	2,5	3,0
6	АИР200М2	37	2,0	2,8
7	АИР200S2	45	2,0	2,8
8	АИР225М2	55	2,0	2,6
9	АИР250S2	75	2,0	3,0
10	АИР250М2	90	2,0	3,0
11	АИР132S4	7,5	4,0	2,5
12	АИР132М4	11	3,5	2,7
13	АИР160S4	15	3,0	2,9
14	АИР160М4	18,5	3,0	2,9
15	АИР180S4	22	2,5	2,4
16	АИР180М4	30	2,0	2,7
17	АИР200М4	37	2,0	2,7
18	АИР200L4	45	2,0	2,7
19	АИР225М4	55	2,0	2,6
20	АИР250L4	75	1,5	2,5
21	АИР132S6	5,5	4,0	2,2
22	АИР132М6	7,5	4,0	2,2
23	АИР160S6	11	3,0	2,7
24	АИР160М6	15	3,0	2,7

25	АИР180М6	18,5	2,0	2,4
----	----------	------	-----	-----

Суть частотного способу регулювання швидкості АД базується на відомій залежності для синхронної швидкості

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (1)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів електродвигуна.

Для сільськогосподарських машин і агрегатів розроблені частотно-регульовані двигуни з межами регулювання частоти 5 - 60 Гц, а напруги 30 - 380 В.

Зміна частоти струму живлення дає можливість змінювати швидкість обертання двигуна в зоні малих ковзань, а значить і малих втратах енергії в роторному колі. Отже, частотне регулювання швидкості асинхронних двигунів характеризується досить високим коефіцієнтом корисної дії. Система частотного регулювання забезпечує високу плавність в досить широкому діапазоні, а штучні механічні характеристики мають високий коефіцієнт жорсткості.

При регулюванні частоти струму на затискачах двигуна змінюються його параметри. Так, при зниженні частоти і незмінній напрузі збільшується струм намагнічування і, як наслідок, зростає магнітний потік. Збільшення частоти струму призводить до зменшення струму і магнітного потоку двигуна. При незмінному статичному моменті на валу двигуна зростає струм ротора і його температурний режим виходить за межі допустимого. Регулювання частоти струму вимагає одночасного регулювання напруги.

Частотно-регульовані приводи дають можливість регулювати швидкість обертання вверх від номінального значення і вниз. Верхня межа регулювання швидкості обмежується механічною міцністю ротора. Збільшення швидкості обертання відносно номінальної не повинно бути більше ніж у два рази. Мінімальна швидкість обертання обмежується нестабільною роботою перетворювача при низьких частотах.

При регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочої машини напругу на виході перетворювача частоти змінюють виходячи з умови збереження переважувальної здатності двигуна

$$\lambda = \frac{M_{\kappa}}{M_c} = const. \quad (2)$$

Як відомо, максимальний момент двигуна становить

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_{\kappa}^2 + X_{\kappa}^2}\right)}. \quad (3)$$

При визначенні закону, за яким необхідно змінювати напругу при зміні частоти струму, вираз (3) записують, зробивши припущення, що $R_1 = 0$

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 X_{\kappa}}. \quad (4)$$

Параметри ω_0 , X_{κ} залежать від частоти струму. Отже, критичний момент виражається залежністю

$$M_{\kappa} = \frac{AU_{\Phi}^2}{f^2}, \quad (5)$$

де A – коефіцієнт, що включає параметри, незалежні від частоти струму.

Перевантажувальна здатність двигуна при різних частотах струму згідно з формулою (2) має вигляд

$$\frac{U_{\Phi H}^2}{f_H^2 M_{CH}} = \frac{U_{\Phi}^2}{f^2 M_C} = \lambda. \quad (6)$$

Вираз (6) у відносних одиницях має вигляд

$$U_* = f_* \sqrt{M_{C*}}, \quad (7)$$

де U_* , f_* , M_{C*} – відповідно напруга, частота струму і статичний момент, в.о.

Статичний момент робочої машини у відносних одиницях, якщо зробити припущення, що $M_0 = 0$, записується

$$M_{C*} = \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^x = \left(\frac{f}{f_H}\right)^x = f_*^x. \quad (8)$$

З урахуванням (8) вираз (7) матиме вигляд

$$U_* = f_* \sqrt{f_*^x}. \quad (9)$$

де x – показник степеня виду механічної характеристики робочої машини.

При зменшенні частоти $f_1 \ll f_{\text{норм}}$ збільшується магнітний потік Φ , що призводить до глибокого насичення магнітного кола і збільшенню намагнічувального струму, який знижує енергетичні показники двигуна ($\cos\varphi$,

η). Щоб магнітний потік Φ залишався постійним, необхідно при зміні частоти f_1 також змінювати напругу з урахуванням виду механічної характеристики виконавчого органу робочої машини.

Рівняння механічної характеристики робочої машини має вигляд

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_n} \right)^x, \quad (10)$$

де M_c – момент опору при швидкості ω ,

M_0 – момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення), який не залежить від швидкості, Н·м;

$M_{сн}$ – момент опору при номінальній швидкості ω_n , Н·м;

ω_n – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

ω_i – поточне значення кутової швидкості, рад/с;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Рациональний закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження M_c . Так при постійному моменті навантаження $M_c = const$ (показник степеня $x = 0$) напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно його частоті

$$\frac{U_1}{f_1} = const. \quad (11)$$

Для механізмів, у яких M_c зменшується нелінійно при збільшенні швидкості (для робочої машини з $x = -1$), відношення (11) має вигляд

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const. \quad (12)$$

Для механізмів з вентиляторним моментом навантаження M_c для робочої машини з $x = 2$ відношення (11) буде мати вигляд

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const. \quad (13)$$

Збільшення частоти джерела живлення вище номінального значення (50 Гц) здійснюється при номінальній напрузі $U_{1н}$, що призводить до зменшення магнітного потоку і електромагнітного моменту, тому в цьому випадку слід знижувати навантаження, щоб уникнути "перекидання" електродвигуна.

Механічні характеристики двигуна при частотному регулюванні швидкості обертання робочих машин з різними механічними характеристиками наведені на рисунку 1 (при $R_1 = 0$).

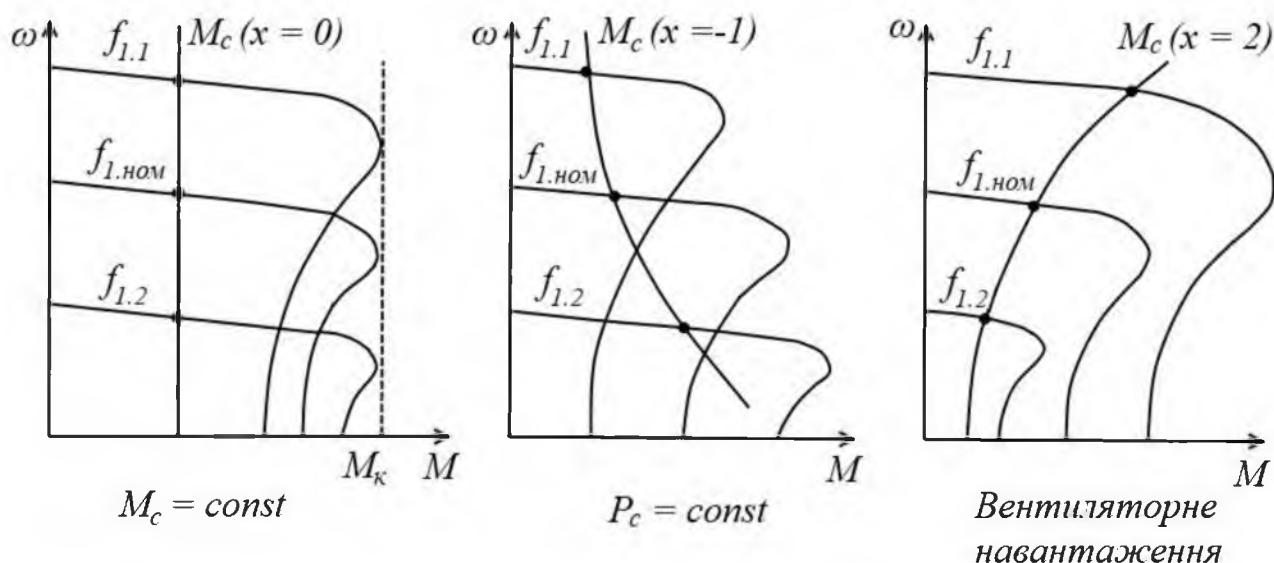


Рисунок 1 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при частотному регулюванні швидкості

Припущення $R_1 = 0$ не вносить помітних похибок в основний закон зміни напруги живлення частотно-регульованих приводів (9), (11), (12), (13) для двигунів великої потужності або при роботі двигунів з незначним зниженням частоти струму. Двигуни великої потужності мають індуктивний опір X_k на порядок більший ніж активний опір R_k . При цьому спад напруги на активному опорі статора незначний і двигун має достатню перевантажувальну здатність.

Для двигунів малої і середньої потужності при номінальній частоті на статорній обмотці активний і індуктивний опори приблизно одного порядку. При зниженні частоти струму індуктивний опір пропорційно знижуватиметься, а активний залишиться незмінним. Отже, спад напруги на активному опорі статора R_1 буде збільшуватись і, як наслідок, перевантажувальна здатність двигуна знизиться. При цьому виникає необхідність коригувати основний закон зміни напруги на статорі двигуна.

Даний спосіб широко використовується для якісного регулювання швидкості АД і широко застосовується в теперішній час. Він забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а отримані при цьому характеристики мають високу жорсткість. Частотний спосіб до того ж відрізняється і ще одною важливою властивістю: регулювання швидкості АД в цьому випадку не супроводжується збільшенням його ковзання, тому втрати потужності є невеликими.

Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна при $f_1 = 50$ Гц можна розрахувати за спрощеною формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S_i}}. \quad (14)$$

Штучна механічна характеристика асинхронного електродвигуна при новій частоті $f_{1.1}$ розраховується за формулою

$$M = \frac{2M_{\kappa} \cdot \lambda^x}{\frac{\lambda \cdot S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{\lambda \cdot S_i}}, \quad (15)$$

де λ – коефіцієнт, що показує співвідношення нової частоти струму до частоти струму мережі $f_1 = 50$ Гц;

x – показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання.

$$\lambda = \frac{f_{1.1}}{f_1}, \quad (16)$$

де $f_{1.1}$ – нова частота струму при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна, Гц.

4 Приклад розрахунку

4.1 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна (АД) при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$).

4.1.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна типу АИР250М6 приводу підйомника з технічними даними:

$$P_{\text{н}} = 55 \text{ кВт}; \quad S_{\text{н}} = 2\%; \quad \mu_{\kappa} = 2,3.$$

Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт;

$\omega_{\text{н}}$ – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

Номінальна кутова швидкість, яка відповідає номінальному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{н}}), \quad (2)$$

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (3)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (4)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для електродвигуна типу АИР250М6 $p = 3$. Отже

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$\omega_H = 104,67 \cdot (1 - 0,02) = 102,58 \text{ рад/с};$$

$$M_H = \frac{55 \cdot 10^3}{102,58} = 536,2 \text{ Н·м.}$$

Критичний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{кр}} = M_H \cdot \mu_k, \quad (5)$$

де μ_k – кратність максимального (критичного) моменту електродвигуна, в.о.

За паспортними даними електродвигуна типу АИР250М6 $\mu_k = 2,3$. Отже

$$M_{\text{кр}} = 536,2 \cdot 2,3 = 1233,26 \text{ Н·м.}$$

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню природної механічної характеристики, визначається за формулою

$$\omega_{\text{кр}} = \omega_0 \cdot (1 - S_k). \quad (6)$$

Критичне ковзання визначаємо за формулою

$$S_{\text{кр}} = S_H \cdot (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}); \quad (7)$$

$$S_{\text{кр}} = 0,02 \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}) = 0,09;$$

$$\omega_{\text{кр}} = 104,67 \cdot (1 - 0,09) = 95,25 \text{ рад/с.}$$

Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна при $f_1 = 50$ Гц розраховуємо за спрощеною формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к пр}}}{\frac{S_i}{S_{\text{к пр}}} + \frac{S_{\text{к пр}}}{S_i}}. \quad (8)$$

Для зручності розрахунків природної механічної характеристики АД при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц зводимо в таблицю 2.

Таблиця 2 – Розрахункові дані природної механічної характеристики АД при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{\text{к пр}}$	$2S_{\text{к пр}}$	$3S_{\text{к пр}}$	$4S_{\text{к пр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$S_i/S_{\text{к пр}}$	0		0,67	1,0	2,0	3,0	4,0	11,11
$S_{\text{к пр}}/S_i$	0		1,5	1,0	0,5	0,33	0,25	0,09
$S_i/S_{\text{к пр}} + S_{\text{к пр}}/S_i$	0		2,17	2,0	2,5	3,33	4,25	11,2
$2M_{\text{к пр}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	2466,52							
$M, \text{ Н}\cdot\text{м},$ за формулою (8)	0	536,2	1136,7	1233,3	986,6	740,7	580,4	2220,2
$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S_i),$ рад/с	104,67	102,58	98,39	95,25	85,83	76,41	66,99	0

За розрахунковими даними таблиці 2 будемо природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц (рисунок 2).

4.1.2 Штучна механічна характеристика асинхронного електродвигуна при новій частоті $f_{1,1}$ розраховується за формулою

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{к пр}} \cdot \lambda^x}{\frac{\lambda \cdot S_i}{S_{\text{к пр}}} + \frac{S_{\text{к пр}}}{\lambda \cdot S_i}},$$

де λ – коефіцієнт, що показує співвідношення нової частоти струму до частоти струму мережі $f_1 = 50$ Гц;

x – показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання.

$$\lambda = \frac{f_{1.1}}{f_1}, \quad (10)$$

де $f_{1.1}$ – нова частота струму при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна, Гц.

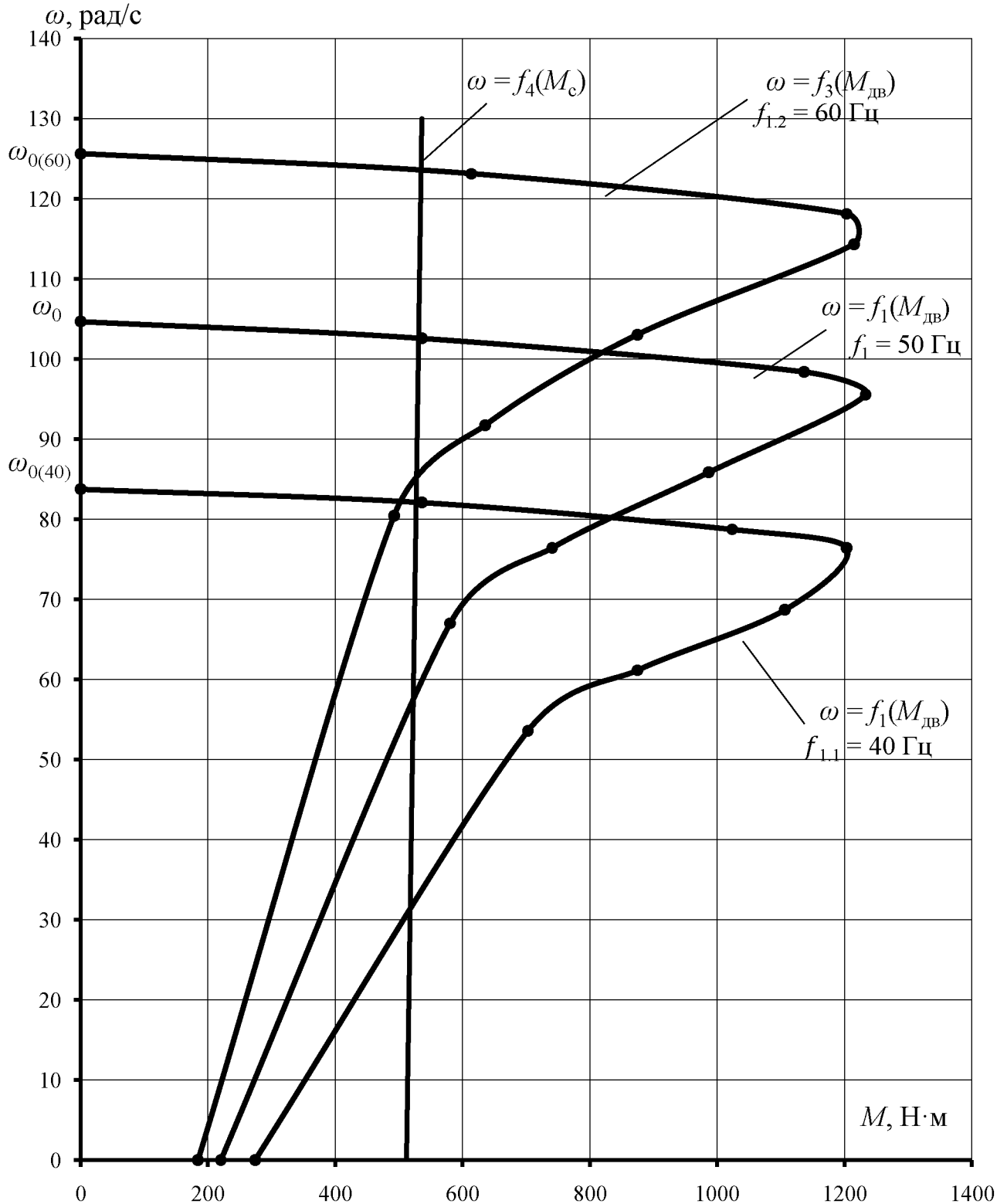


Рисунок 2 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу

підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

Для підйомника показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання дорівнює $x = 0$. За умовою нова частота струму $f_{1.1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1.1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^0 = 1.$$

Формула (9) для підйомника з $x = 0$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц буде мати вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр}}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (11)$$

Синхронна кутова швидкість при частоті струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц буде дорівнювати

$$\omega_{0(40)} = \lambda_1 \cdot \omega_{0пр} = 0,8 \cdot \omega_{0пр} = 0,8 \cdot 104,67 = 83,74 \text{ рад/с.}$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при новій частоті струму $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу підйомника ($x = 0$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
$0,8S_i/S_{кпр}$	0	0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	8,89
$S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$2M_{кпр}$, Н·м	2466,52							
M , Н·м, за формулою (11)	0	424,5	1023,5	1203,2	1106,1	874,7	702,7	274,1
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 3 будемо штучну механічну

характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1.1} = 40$ Гц (рис. 2).

4.1.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу підйомника при новій частоті струму $f_{1.2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{f_{1.2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^0 = 1.$$

Формула (9) для підйомника з $x = 0$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.2} = 60$ Гц буде мати вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{к пр}}}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{\text{к пр}}} + \frac{S_{\text{к пр}}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (12)$$

Синхронна кутова швидкість при частоті струму мережі $f_{1.2} = 60$ Гц буде дорівнювати

$$\omega_{0(60)} = \lambda_2 \cdot \omega_{0\text{ пр}} = 1,2 \cdot \omega_{0\text{ пр}} = 1,2 \cdot 104,67 = 125,6 \text{ рад/с.}$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при новій частоті струму $f_{1.2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 4.

Таблиця 4 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу підйомника ($x = 0$) при $f_{1.2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	$S_{\text{н}}$	$3S_{\text{н}}$	$S_{\text{к пр}}$	$2S_{\text{к пр}}$	$3S_{\text{к пр}}$	$4S_{\text{к пр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{\text{к пр}}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{\text{к пр}}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{\text{к пр}} + S_{\text{к пр}}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$2M_{\text{к пр}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	2466,52							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м},$ за формулою (12)	0	613,6	1203,2	1215,0	874,7	635,7	492,3	184,3
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i), \text{ рад/с}$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 4 будемо штучну механічну

характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1,2} = 60$ Гц (рис. 2).

4.2 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$).

4.2.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням.

Для приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням використовується той же двигун, що і в пункті 4.1, тому природну механічну характеристику будуюмо за даними таблиці 2 (рисунок 3).

4.2.2 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 1$ на нову частоту струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1,1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^1 = 0,8.$$

Формула (9) для генератора постійного струму з незалежним збудженням з $x = 1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{кпр}} \cdot 0,8}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{\text{кпр}}} + \frac{S_{\text{кпр}}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (13)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) на нову частоту струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 5.

Таблиця 5 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при $f_{1,1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{\text{кпр}}$	$2S_{\text{кпр}}$	$3S_{\text{кпр}}$	$4S_{\text{кпр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{\text{кпр}}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{\text{кпр}}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{\text{кпр}} + S_{\text{кпр}}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$0,8 \cdot 2M_{\text{кпр}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	1973,22							

$M, \text{Н}\cdot\text{м, за формулою (13)}$	0	339,6	818,8	962,5	884,9	699,7	562,2	219,2
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i), \text{рад/с}$	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 5 будуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при $f_{1,1} = 40$ Гц (рис. 3).

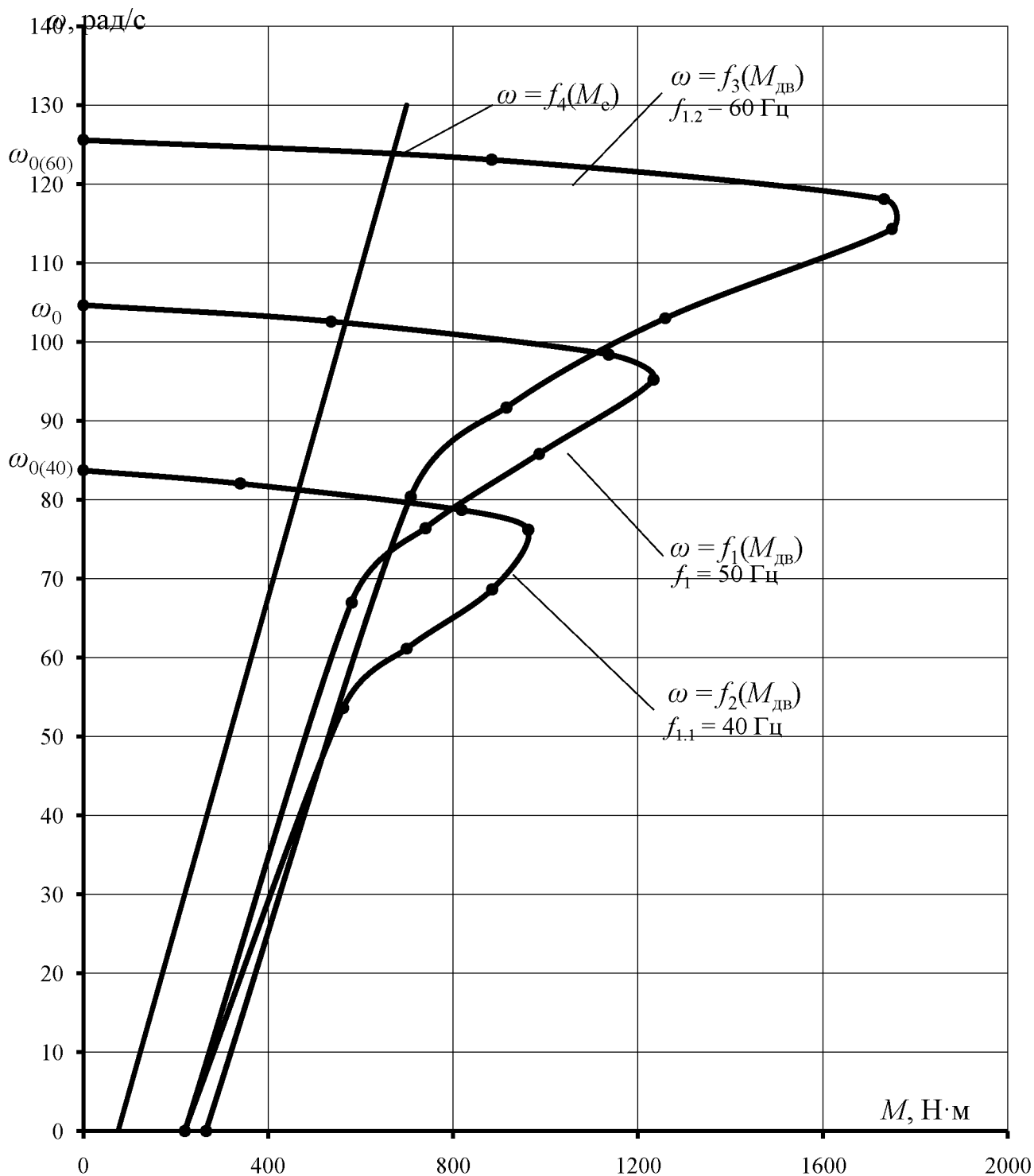


Рисунок 3 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу

генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$)
при регулюванні швидкості обертання частотою струму

4.2.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 1$ на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{f_{1,2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^1 = 1,2.$$

Формула (9) для генератора постійного струму з незалежним збудженням з $x = 1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 1,2}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (14)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 6.

Таблиця 6 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$1,2 \cdot 2M_{кпр}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	2959,82							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м},$ за формулою (14)	0	736,3	1443,8	1458,0	1049,6	762,8	590,8	221,2
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i), \text{ рад/с}$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 6 будуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу генератора постійного

струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1.2} = 60$ Гц (рис. 3).

4.3 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу насоса ($x = 2$).

4.3.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу насоса.

Для приводу насоса використовується той же двигун, що і в пункті 4.1, тому природну механічну характеристику будуємо за даними таблиці 2 (рисунок 4).

4.3.2 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу насоса з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 2$ на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1.1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^2 = 0,64.$$

Формула (9) для насоса з $x = 2$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{кпр}} \cdot 0,64}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{\text{кпр}}} + \frac{S_{\text{кпр}}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (15)$$

Для зручності розрахунок штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x = 2$) на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 7.

Таблиця 7 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{\text{кпр}}$	$2S_{\text{кпр}}$	$3S_{\text{кпр}}$	$4S_{\text{кпр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{\text{кпр}}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{\text{кпр}}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{\text{кпр}} + S_{\text{кпр}}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$0,64 \cdot 2M_{\text{кпр}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	1578,57							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м},$	0	271,7	655,0	770,0	707,9	559,8	449,7	175,4

за формулою (15)								
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 7 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x = 2$) при частоті струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц (рис. 4).

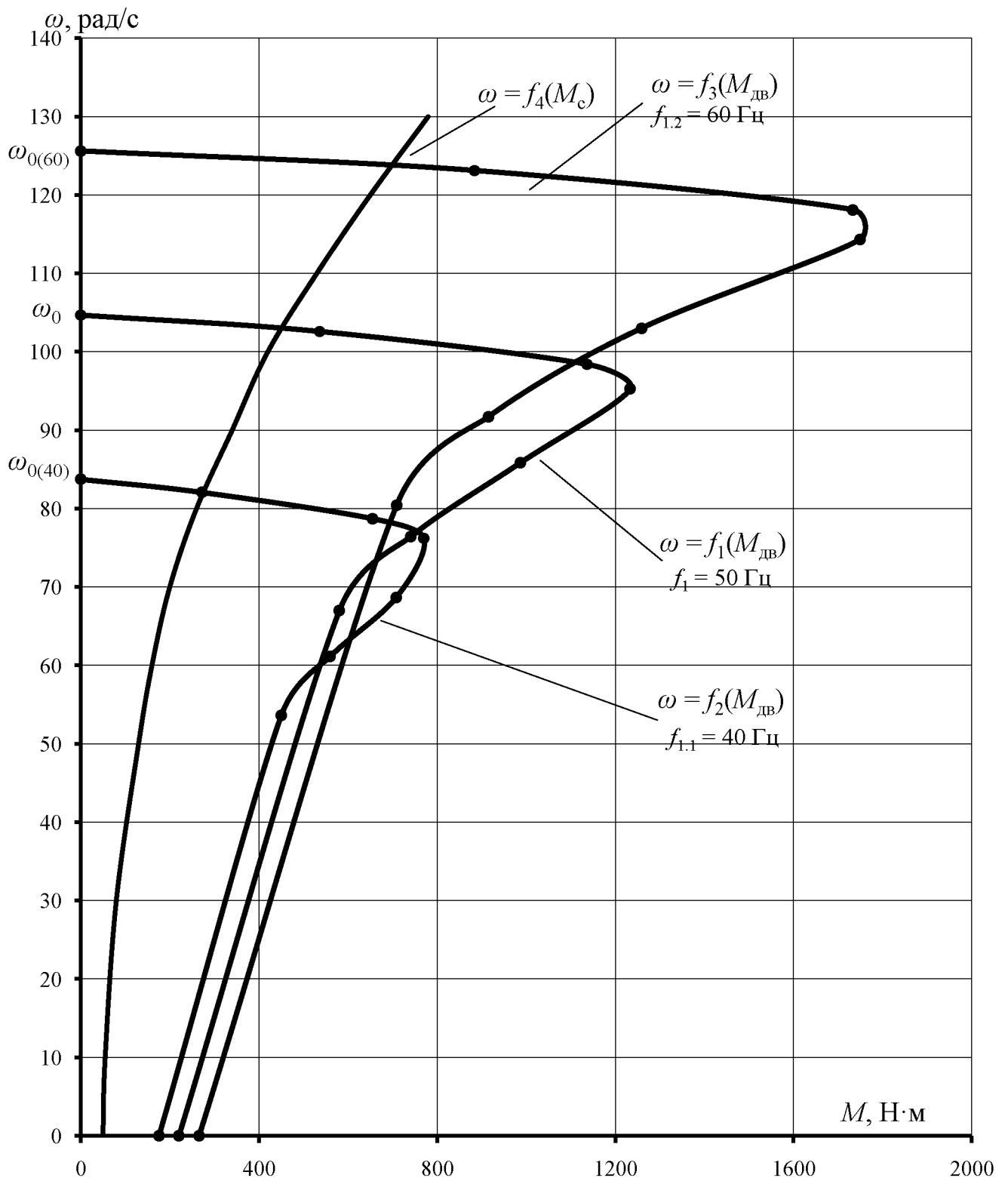


Рисунок 4 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

4.3.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику АД приводу насоса з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 2$ на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{f_{1,2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^2 = 1,44.$$

Формула (9) для насоса з $x = 2$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 1,44}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (16)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 8.

Таблиця 8 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$1,44 \cdot 2M_{кпр}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	3551,79							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м},$ за формулою (16)	0	883,5	1732,6	1749,7	1259,5	915,4	708,9	265,5
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i), \text{ рад/с}$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 8 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x = 2$) при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц (рис. 4).

4.4 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$).

4.4.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу фрезерного верстата.

Для приводу фрезерного верстата використовується той же електродвигун, що і в пункті 4.1, тому природну механічну характеристику будемо за даними таблиці 2 (рисунк 5).

4.4.2 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу фрезерного верстата з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = -1$ на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1.1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^{-1} = 1,25.$$

Формула (9) для фрезерного верстата з $x = -1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{к пр}} \cdot 1,25}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{\text{к пр}}} + \frac{S_{\text{к пр}}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (17)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 9.

Таблиця 9 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	$S_{\text{н}}$	$3S_{\text{н}}$	$S_{\text{к пр}}$	$2S_{\text{к пр}}$	$3S_{\text{к пр}}$	$4S_{\text{к пр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{\text{к пр}}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{\text{к пр}}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{\text{к пр}} + S_{\text{к пр}}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$1,25 \cdot 2M_{\text{к пр}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	3083,15							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}, \text{ за формулою (17)}$	0	530,7	1279,3	1504,0	1382,6	1093,3	878,4	342,6
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i), \text{ рад/с}$	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 9 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при частоті струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц (рис. 5).

4.4.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу фрезерного верстата з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = -1$ на нову частоту струму мережі $f_{1.2} = 60$ Гц. Тоді

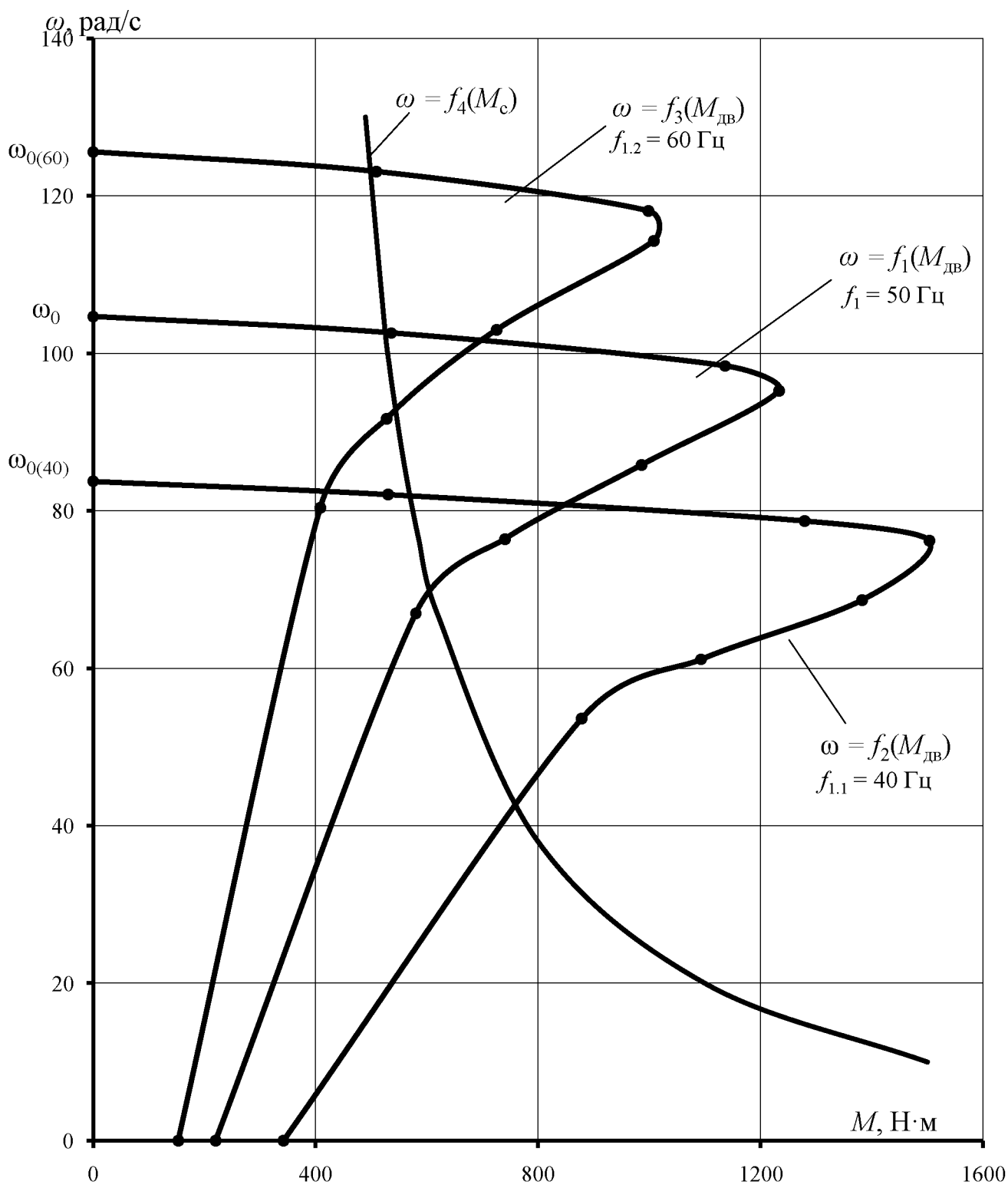


Рисунок 5 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

$$\lambda_2 = \frac{f_{1.2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^{-1} = 0,83.$$

Формула (9) для фрезерного верстата з $x = -1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{кпр}} \cdot 0,83}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{\text{кпр}}} + \frac{S_{\text{кпр}}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (18)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 10.

Таблиця 10 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	$S_{\text{н}}$	$3S_{\text{н}}$	$S_{\text{кпр}}$	$2S_{\text{кпр}}$	$3S_{\text{кпр}}$	$4S_{\text{кпр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{\text{кпр}}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{\text{кпр}}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{\text{кпр}} + S_{\text{кпр}}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$0,83 \cdot 2M_{\text{кпр}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	2047,21							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м},$ за формулою (18)	0	509,3	998,6	1008,5	726,0	527,6	408,7	153,0
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i), \text{ рад/с}$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 10 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц (рис. 5).

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

1 Варіант індивідуального завдання.

2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.

3 Таблиці з результатами розрахунків.

4 Природні $\omega = f(M_{\text{дв}})$ та штучні $\omega = f_{1,1}(M_{\text{дв}})$, $\omega = f_{1,2}(M_{\text{дв}})$ механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором приводу підйомника, генератора постійного струму з незалежним збудженням, насоса та фрезерного верстата при регулюванні швидкості обертання частотою струму.

5 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Яку залежність називають механічною характеристикою асинхронного електродвигуна (АД)?
- 2 Що називається природною та штучною характеристиками АД?
- 3 Що таке максимальний момент та як його можна розрахувати за каталоговими даними електродвигуна?
- 4 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні АД?
- 5 Як розрахувати поточне значення моменту для побудови механічних характеристик АД?
- 6 Як залежить момент асинхронного електродвигуна від величини підведеної до нього напруги?
- 7 Назвіть можливі способи регулювання швидкості АД.
- 8 На чому базується частотний спосіб регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна які показники регулювання? Які одержують штучні характеристики? Який їх коефіцієнт жорсткості?
- 9 Чи можна використовувати електродвигуни загального призначення в частотно-регульованих приводах? Для яких двигунів ставляться підвищені вимоги до вибору номінального ковзання при їх паралельній роботі?
- 10 З якими межами регулювання частоти і напруги розроблені частотно-регульовані двигуни для сільськогосподарських машин і агрегатів?
- 11 Який напрямок регулювання у частотно-регульованих приводах? Чим обмежується верхня межа регулювання швидкості і мінімальна частота обертання?
- 12 Який параметр двигуна необхідно змінювати для кращого використання АД і одержання високих енергетичних показників його роботи – коефіцієнта потужності, ККД, перевантажувальної здатності – одночасно із зміною частоти напруги живлення? Від чого при цьому залежить закон його зміни?
- 13 Як змінюють напругу на виході перетворювача частоти при регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочих машин?
- 14 Як визначається перевантажувальна здатність двигуна λ ?
- 15 Який вигляд матиме вираз основного закону зміни напруги при частотному способі регулювання швидкості АД?
- 16 Чому при частотному регулюванні разом із зміною частоти необхідно змінювати і напругу?
- 17 За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму?
- 18 Який вигляд мають штучні МХ АД при частотному регулюванні швидкості обертання робочої машини з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 0$? $x = 1$? $x = 2$? $x = -1$?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку електромеханічних і механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором для різних режимів роботи.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, с. 79-94].

1.2 Ознайомитися з методикою розрахунку електромеханічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом ротора і за струмом статора.

1.3 Ознайомитися з методикою розрахунку природної та штучних механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором для різних режимів.

1.4 ВІДПОВІСТИ НА КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для заданого електродвигуна з фазним ротором розрахувати та побудувати природні електромеханічні характеристики за струмом ротора $\omega = f_1(I_2')$ та за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$.

2.2 Для заданого електродвигуна з фазним ротором розрахувати та побудувати природну механічну характеристику $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$.

2.3 Розрахувати та побудувати штучну механічну характеристику $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при введенні в коло ротора активного опору $\ddot{R}_{2\text{д}} = 0,1$ при номінальній напрузі і номінальній частоті мережі.

2.4 Розрахувати та побудувати штучну механічну характеристику $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі на 10 %, коли $R_{2\text{д}} = 0$, $f_1 = 50\text{Гц}$.

3 Загальні відомості і рекомендації

Робота електропривода визначається ефективністю функціонування електродвигуна, тому важливо знати закономірності електромеханічного перетворення в процесі роботи електропривода електричної енергії в механічну і навпаки. Знання фізичних процесів, що відбуваються в електричній машині в двигунному і гальмівних режимах, допоможе їх математичному опису, визначенню шляхів керування електромеханічними процесами перетворення енергії і розрахунку характеристик електропривода.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електро-двигуна	P_H , кВт	Енергетичні показники		I_{2H} , А	E_{2K} , В	Механічна характеристика		
			η_H , %	$\cos \varphi$, в.о.			μ_K , в.о.	S_H , %	S_K , %
1	4AK160S4Y3	11,0	86,5	0,86	22	305	3,0	4,4	33,0
2	4AK160M4Y3	14,0	88,5	0,87	29	300	3,5	3,7	32,1
3	4AK180M4Y3	18,5	89,0	0,88	38	295	4,0	2,9	31,1
4	4AK200M4Y3	22,0	90,0	0,87	45	340	4,0	2,5	22,0
5	4AK200L4Y3	30,0	90,5	0,87	55	350	4,0	2,5	22,0
6	4AK225M4Y3	37,0	90,0	0,87	160	160	3,0	3,5	20,0
7	4AK250SA4Y3	45,0	91,5	0,88	170	230	3,0	3,0	20,5
8	4AK250SB4Y3	55,0	90,5	0,90	170	200	3,0	2,3	19,6
9	4AK250M4Y3	71,0	91,5	0,86	170	250	3,0	2,5	19,5
10	4AK160M6Y3	10,0	84,5	0,76	20	310	3,8	4,3	27,1
11	4AK180M6Y3	13,0	85,5	0,80	25	325	4,0	4,4	29,1
12	4AK200M6Y3	18,5	88,0	0,81	35	360	3,5	3,5	27,5
13	4AK200L6Y3	22,0	88,0	0,80	45	330	3,5	3,5	21,0
14	4AK225M6Y3	30,0	89,0	0,85	150	140	2,5	3,5	19,5
15	4AK250S6Y3	37,0	89,0	0,84	165	150	2,5	3,5	18,0
16	4AK250M6Y3	45,0	90,5	0,87	160	180	2,5	2,5	17,0
17	4AK160S8Y3	5,5	80,0	0,70	14	300	2,5	6,4	29,0
18	4AK160M8Y3	7,1	82,0	0,70	6	290	3,0	5,5	23,2
19	4AK180M8Y3	11,0	85,5	0,72	25	270	3,5	4,4	22,7
20	4AK200M8Y3	15,0	86,0	0,70	28	360	3,0	3,5	23,0
21	4AK200L8Y3	18,5	86,0	0,73	40	300	3,0	3,5	21,5
22	4AK225M8Y3	22,0	87,0	0,82	140	102	2,2	4,5	19,5
23	4AK250S8Y3	30,0	88,5	0,81	155	125	2,2	4,0	20,0
24	4AK250M8Y3	37,0	89,0	0,80	155	148	2,2	3,5	18,5
25	4AHK160M4Y3	17,0	88,0	0,87	34	315	3,5	4,1	32,3

Продовження таблиці 1

Варіант	Тип електро-двигуна	P_n , кВт	Параметри схеми заміщення, в.о.			
			$\ddot{R}_1$, в.о.	$\ddot{X}_1$, в.о.	$\ddot{R}_2$, в.о.	$\ddot{X}_2$, в.о.
1	4AK160S4Y3	11,0	0,038	0,068	0,051	0,086
2	4AK160M4Y3	14,0	0,032	0,060	0,042	0,078
3	4AK180M4Y3	18,5	0,022	0,042	0,034	0,063
4	4AK200M4Y3	22,0	0,024	0,050	0,026	0,075
5	4AK200L4Y3	30,0	0,026	0,057	0,030	0,087
6	4AK225M4Y3	37,0	0,023	0,061	0,027	0,069
7	4AK250SA4Y3	45,0	0,020	0,067	0,030	0,080
8	4AK250SB4Y3	55,0	0,017	0,061	0,025	0,073
9	4AK250M4Y3	71,0	0,015	0,053	0,021	0,064
10	4AK160M6Y3	10,0	0,043	0,071	0,058	0,13
11	4AK180M6Y3	13,0	0,035	0,065	0,057	0,11
12	4AK200M6Y3	18,5	0,030	0,060	0,038	0,078
13	4AK200L6Y3	22,0	0,032	0,066	0,041	0,089
14	4AK225M6Y3	30,0	0,029	0,073	0,030	0,091
15	4AK250S6Y3	37,0	0,026	0,063	0,024	0,078
16	4AK250M6Y3	45,0	0,029	0,062	0,024	0,092
17	4AK160S8Y3	5,5	0,060	0,112	0,094	0,175
18	4AK160M8Y3	7,1	0,053	0,11	0,079	0,208
19	4AK180M8Y3	11,0	0,041	0,086	0,062	0,167
20	4AK200M8Y3	15,0	0,040	0,081	0,048	0,12
21	4AK200L8Y3	18,5	0,038	0,089	0,046	0,12
22	4AK225M8Y3	22,0	0,039	0,100	0,043	0,13
23	4AK250S8Y3	30,0	0,033	0,081	0,034	0,10
24	4AK250M8Y3	37,0	0,031	0,078	0,031	0,10
25	4AHK160M4Y3	17,0	0,035	0,067	0,047	0,087

Асинхронний двигун є універсальним перетворювачем енергії, в якому відбувається перетворення напруги статора U_1 в напругу ротора U_2 , частоти живлення f_1 в частоту струму ротора f_2 , електричної потужності P_1 , що споживається з мережі, в механічну потужність P_2 , що розвивається електродвигуном.

При підключенні обмотки статора двигуна до мережі трифазного струму виникає обертове магнітне поле, кутова швидкість якого ω_0 називається синхронною і знаходиться за формулою

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (1)$$

де f_1 – частота змінного струму промислової частоти, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – число пар полюсів двигуна, яке визначається з паспортних даних.

Різниця між синхронною кутовою швидкістю і поточним значенням кутової швидкості ротора, віднесена до синхронної швидкості ω_0 , називається ковзанням

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (2)$$

Для двигунного режиму $S = 1 \dots 0$ і потужність на валу визначається

$$P_2 = M \cdot \omega = P_{\text{ем}} \cdot (1 - S), \quad (3)$$

де $P_{\text{ем}} = M \cdot \omega_0$ – електромагнітна потужність, Вт.
 Різниця

$$P_{\text{ем}} - P_2 = P_{\text{ем}} \cdot S = \Delta P \quad (4)$$

представляє втрати потужності при електромеханічному перетворенні енергії, які пропорційні ковзанню.

Для зручності розгляду процесів, що відбуваються, і спрощення рівнянь, параметри обмотки ротора приводяться до обмотки статора. Смысл приведення складається в умовній заміні дійсної роторної обмотки фіктивною, яка має теж число фаз і витків і той же обмотувальний коефіцієнт, що і статорна обмотка. В позначеннях коефіцієнти з індексом 1 відносяться до обмотки статора (первинного кола), а з індексом 2 – до обмотки ротора (вторинного кола).

На практиці у більшості двигунів кількість фаз статора і ротора однакова, тому формули приведення матимуть вигляд:

– приведений до статора струм ротора

$$I'_2 = \frac{I_2}{K_E}, \quad (5)$$

де I_2 – дійсний струм ротора, А;
 K_E – коефіцієнт трансформації електрорушійної сили (ЕРС).

$$K_E = \frac{E_1}{E_2}, \quad (6)$$

де E_1, E_2 – відповідно ЕРС обмоток статора і ротора, В;
 – приведені до обмотки статора опори ротора дорівнюють

$$R'_2 = R_2 \cdot K_E^2, \quad X'_2 = X_2 \cdot K_E^2, \quad (7)$$

де R_2, X_2 – відповідно дійсні активний та індуктивний опори фази ротора, Ом.

Коефіцієнт K_E можна визначити за паспортними даними двигуна

$$K_E \approx 0,95 \cdot \frac{U_{\text{лн}}}{E_{2\text{к}}}, \quad (8)$$

де 0,95 – коефіцієнт, що враховує 5 % втрату напруги в обмотці статора;
 $U_{\text{лн}}$ – номінальна лінійна напруга статора, $U_{\text{лн}} = 380$ В;
 $E_{2\text{к}}$ – ЕРС між кільцями нерухомого фазного ротора, В.

Із визначення коефіцієнта K_E відомо, що приведена до обмотки статора ЕРС ротора дорівнює

$$E'_2 = E_2 \cdot K_E = E_1, \quad (9)$$

а коефіцієнт трансформації струму

$$K_T = \frac{I_2}{I'_2}. \quad (10)$$

Опори короткого замикання двигуна в загальному випадку можна визначити за формулами

$$R_{\text{к}} = R_1 + R'_2, \quad X_{\text{к}} = X_1 + X'_2. \quad (11)$$

Якщо обмотки двигуна з'єднані в трикутник, то його слід замінити схемою еквівалентної зірки, для якої опори приймають рівними 1/3 фактичних опорів фаз статора і ротора.

За паспортними даними номінальний струм статора двигуна розраховується за формулою

$$I_{1н} = \frac{P_{н}}{\sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot \cos \varphi_{н} \cdot \eta_{н}}. \quad (12)$$

Електромеханічна характеристика визначає залежність між кутовою швидкістю ротора ω (або ковзанням) і струмом статора I_1 або струмом ротора I_2' .

Електромеханічну характеристику асинхронного двигуна за струмом ротора розраховують за формулою

$$I_2'(S) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (13)$$

В режимі ідеального холостого ходу через обмотку статора протікає тільки струм намагнічування I_{μ} , який створює магнітний потік в статорі, тому струм статора визначається як геометричний добуток приведенного струму ротора і намагнічуючого струму

$$\ddot{I}_1^2 = \ddot{I}_1'^2 + \ddot{I}_{\mu}^2. \quad (14)$$

Механічною характеристикою асинхронного двигуна називають залежність електромагнітного моменту M від ковзання, тобто $M = f(S)$ або $\omega = f(M)$

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_1 \cdot S \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (15)$$

Ковзання, при якому момент двигуна буде максимальним, називається критичним і визначається виразом

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (16)$$

Знак «+» відповідає режиму двигуна, а знак «-» – генераторному режиму з рекуперацією енергії в мережу. Якщо підставити в рівняння (15) значення S_k , то отримаємо вираз критичного моменту

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_1 \cdot S \cdot \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (17)$$

З формули (17) випливає, що M_k в генераторному режимі буде від'ємним і за абсолютним значенням в 1,5...3 рази більше критичного моменту в режимі двигуна.

Поділивши рівняння (15) на рівняння (17), після відповідних перетворень отримаємо рівняння механічної характеристики, що застосовується для двигунів малої потужності (уточнена формула Клосса)

$$M = \frac{2M_k \cdot (1 + aS_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2aS_k}, \quad (18)$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до

приведеного активного опору обмотки ротора, в.о.;

R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R'_2 – приведений активний опір кола ротора, Ом;

S – поточне ковзання, в.о.;

S_k – критичне значення ковзання, в.о.

Для двигунів середньої та великої потужності, вважаючи $R_1 \approx 0$, механічну характеристику будують за спрощеною формулою Клосса, яка дозволяє використовувати лише паспортні дані двигуна

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (19)$$

Критичне ковзання можна знайти за формулою

$$S_k = S_n \cdot (1 + \sqrt{\mu_k^2 - 1}), \quad (20)$$

де μ_k – перевантажувальна здатність двигуна, в.о., $\mu_k = M_k / M_n$.

Штучні характеристики асинхронних електродвигунів **Реостатні механічні характеристики**

Цей метод застосовується для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором шляхом включення резисторів в коло статора, а для асинхронних двигунів з фазним ротором – включенням резисторів в коло ротора. Схеми включення асинхронних електродвигунів представлені на рисунку 1.

Зміну опору роторного кола здійснюють в асинхронних двигунах з фазним ротором, наприклад АИРФ, які є електричною модифікацією двигунів загального використання серії АИР. Двигуни з фазним ротором використовують в приводах з важкими умовами пуску або тих, що потребують

регулювання частоти обертання в невеликому діапазоні.

Загальний вигляд механічних характеристика асинхронного двигуна при зміні опорів в колі статора і ротора наведений на рисунку 2.

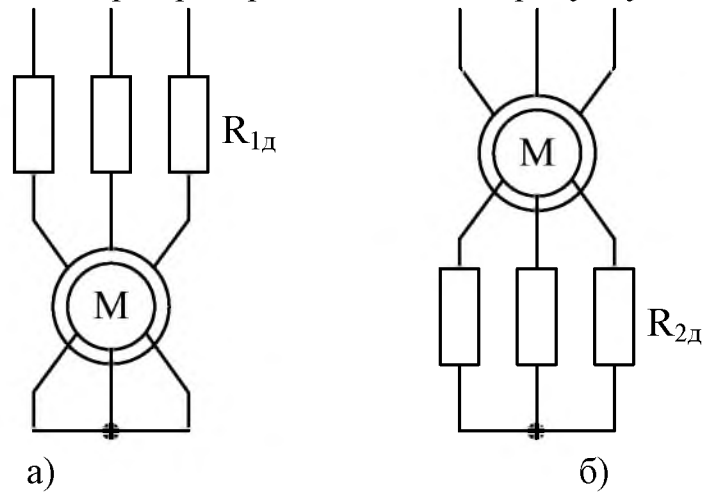


Рисунок 1 – Схеми включення додаткових резисторів:
а – ЕД з короткозамкненим ротором; б – ЕД з фазним ротором

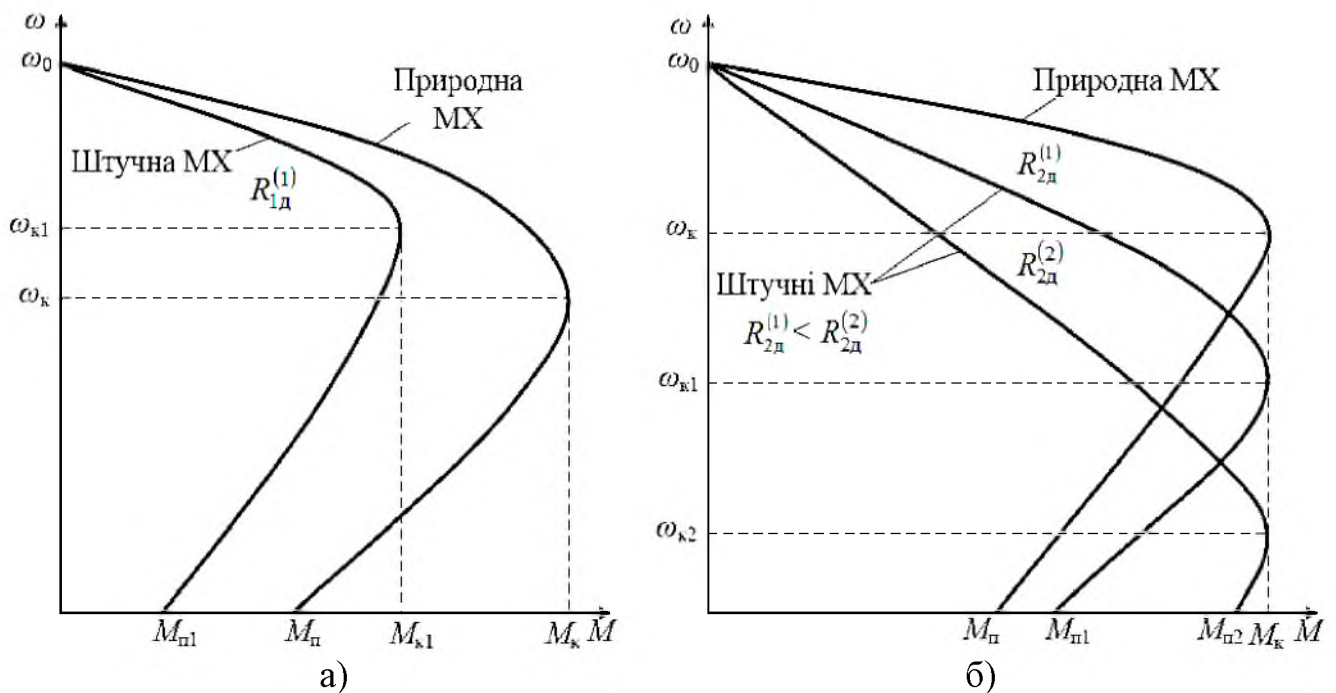


Рисунок 2 – Реостатні механічні характеристики асинхронних двигунів:
а – з короткозамкненим ротором; б – з фазним ротором

При введенні резисторів в коло статора знижуються величини критичного моменту і критичного ковзання двигуна, оскільки ці параметри залежать від опору кола статора.

При введенні додаткових резисторів в коло ротора згідно рівняння (16) критичне ковзання двигуна збільшується, а критичний момент M_k двигуна (17) не змінюється, оскільки не залежить від опору кола ротора. Введення додаткового опору в коло ротора призводить до зменшення пускового струму,

пусковий момент збільшується, доки критичне ковзання досягне одиниці. Подальше збільшення опору роторного кола призводить до зменшення пускового моменту. Синхронна частота обертання також залишається без змін.

Механічні характеристики при зміні напруги живлення

Зниження напруги живлення поєднано із значним зменшенням критичного моменту (вираз 21) при збереженні постійним критичного ковзання (критичної кутової швидкості).

$$M_{к1} = M_{к} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{н}} \right)^2. \quad (21)$$

Загальний вигляд механічних характеристика асинхронного двигуна при зміні напруги живлення на статорі наведений на рисунку 3.

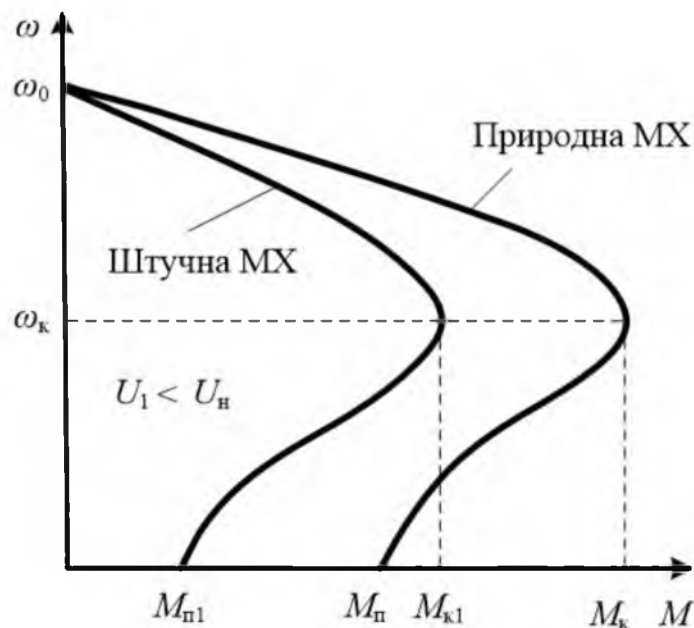


Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронних двигунів при зниженні напруги живлення на статорі

4 Приклад розрахунку

4.1 Для заданого електродвигуна типу 4AK160S6Y3 з фазним ротором розрахувати природні електромеханічні характеристики за струмом ротора і струмом статора. Технічна характеристика двигуна приведена в таблиці 2.

Електромеханічну характеристику асинхронного двигуна за струмом ротора розраховуємо згідно схеми заміщення за формулою

$$I'_2(S) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}},$$

де U_1 – діюче значення фазної напруги, В;

X_1, R_1 – відповідно індуктивний і активний опір обмотки фази статора, Ом;
 I'_2, R'_2, X'_2 – відповідно приведені до обмотки статора струм ротора, А;
 активний і індуктивний опори фази ротора, Ом;
 S – ковзання електродвигуна, в.о.

Таблиця 2 - Параметри електродвигуна типу 4AK160S6Y3

Параметри	Показники
Номінальна потужність P_H , кВт	7,5 кВт
Номінальний ККД, η_H , %	82,5%
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_H$, в.о.	0,77
Номінальний струм ротора I_{2H} , А	18 А
Електрорушійна сила (ЕРС) ротора E_{2K} , В	300 В
Синхронна частота обертання n_0 , об/хв.	1000 об/хв.
Кратність критичного моменту μ_K , в.о.	3,5
Номінальне ковзання S_H , %	5,1 %
Критичне ковзання S_K , %	30,1%
Активний опір статора $\ddot{R}_1$, в.о.	0,054 в.о.
Реактивний опір статора $\ddot{X}_1$, в.о.	0,079 в.о.
Активний опір ротора, приведений $\ddot{R}'_2$, в.о.	0,068 в.о.
Реактивний опір ротора, приведений $\ddot{X}'_2$, в.о.	0,120 в.о.

Оскільки в формулі опори надані в абсолютних одиницях, а в паспортних даних наведені у відносних одиницях, знаходимо їх абсолютні значення.

Номінальний струм статора двигуна розраховується за формулою

$$I_{1H} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H},$$

де $U_{лн}$ – лінійна номінальна напруга, $U_{лн} = 380$ В.

$$I_{1H} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,77 \cdot 0,825} = 17,9 \text{ А.}$$

Повний номінальний опір фази обмотки статора дорівнює

$$Z_{1H} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}},$$

$$Z_{1н} = \frac{220}{17,9} = 12,3 \text{ Ом}.$$

Опори, наведені у відносних одиницях, надані при робочій температурі обмоток двигуна, тому додаткового приведення до робочої температури не потребують. Визначаємо опори обмоток в абсолютних одиницях

$$R_1 = \ddot{R}_1 \cdot Z_{1н};$$

$$R_1 = 0,054 \cdot 12,3 = 0,66 \text{ Ом};$$

$$X_1 = \ddot{X}_1 \cdot Z_{1н};$$

$$X_1 = 0,79 \cdot 12,3 = 0,97 \text{ Ом};$$

$$R'_2 = \ddot{R}'_2 \cdot Z_{1н};$$

$$R'_2 = 0,068 \cdot 12,3 = 0,84 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = \ddot{X}'_2 \cdot Z_{1н};$$

$$X'_2 = 0,120 \cdot 12,3 = 1,48 \text{ Ом}.$$

Виконаємо розрахунок основних точок електромеханічної характеристики:

- точка ідеального холостого ходу (синхронна кутова швидкість)
при цьому ковзання $S = 0$; $I'_2 = 0$;
- точка короткого замикання
при цьому ковзання $S = 1$; $I'_2 = I'_{2п}$ – приведений пусковий струм

$$I'_{2п} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2п} = \frac{220}{\sqrt{(0,66 + 0,84)^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 76,6 \text{ А};$$

- приведенне граничне значення струму ротора
при цьому ковзання $S = \infty$; $I'_2 = I'_{2гр}$

$$I'_{2гр} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{гр}} = \frac{220}{\sqrt{0,66^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 86,7 \text{ A};$$

– приведенне максимальне значення струму ротора при цьому максимальне ковзання

$$S_{\text{макс}} = -\frac{R'_2}{R_1};$$

$$S_{\text{макс}} = -\frac{0,84}{0,66} = -1,27 \text{ в.о.};$$

$$I'_{2\text{макс}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{(X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{макс}} = \frac{220}{\sqrt{(0,97 + 1,48)^2}} = 89,8 \text{ A};$$

– приведенне номінальне значення струму ротора при цьому номінальне ковзання, згідно паспортних даних $S_{\text{н}} = 0,051$

$$I'_{2\text{н}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{н}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,66 + \frac{0,84}{0,051}\right)^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 12,7 \text{ A};$$

– приведенне критичне значення струму ротора при цьому критичне ковзання, згідно паспортних даних $S_{\text{к}} = 0,301$

$$I'_{2\text{к}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{к}}}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{к}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,66 + \frac{0,84}{0,301}\right)^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 52,0 \text{ A}.$$

За знайденими значеннями приведених струмів і відповідних ним ковзань будуюмо природну електромеханічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом ротора $\omega = f_1(I'_2)$ (рисунок 4).

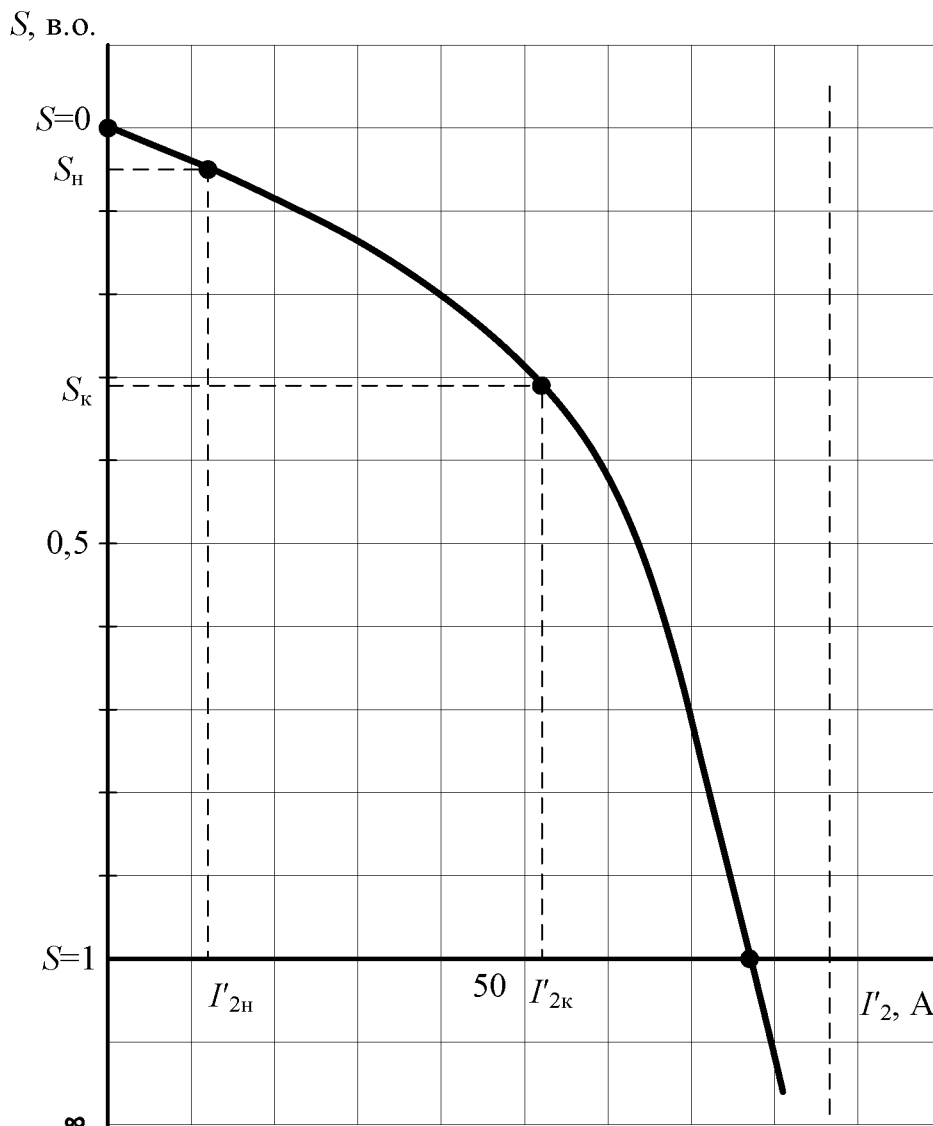


Рисунок 4 – Електромеханічна характеристика $\omega = f_1(I'_2)$ за струмом ротора асинхронного електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3

Електромеханічна характеристика електродвигуна виражена залежністю швидкості (навантаження) від струму статора $\omega = f_2(I_1)$.

Характер зміни струму статора визначається зміною струму ротора у відповідності із рівнянням

$$I_1 = I_0 + I'_{2\text{макс}},$$

де I_0 – струм холостого ходу електродвигуна, А;

$I'_{2\text{макс}}$ – максимальне значення струму ротора, приведенне до числа витків статорної обмотки, А.

Кутову швидкість обертання ротора при будь-якому ковзанні визначаємо за рівнянням

$$\omega_i = \omega_0(1 - S_i),$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$$I_0 = 0,3 \cdot 17,9 = 5,37 \text{ А};$$

$$I_{1\text{макс}} = 5,37 + 89,8 = 95,2 \text{ А};$$

$$\omega_{\text{макс}} = 104,7(1 - (-1,27)) = 237,7 \text{ рад/с}.$$

Подальші розрахунки електромеханічної характеристики за струмом статора оформлюємо у вигляді таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку електромеханічної характеристики за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$

$S_i, \text{ в.о.}$	$S_{\text{макс}} = -\frac{R'_2}{R_1}$	$S_{\text{х.х.}} = 0$	$S_{\text{н}}$	$S_{\text{к}}$	$S_{\text{п}} = 1$	$S = \pm\infty$
$I'_{2i}, \text{ А}$	$I'_{2\text{макс}}$	$I'_2 = 0$	$I'_{2\text{н}}$	$I'_{2\text{к}}$	$I'_{2\text{п}}$	$I'_{2\text{гр}}$
$\omega_i, \text{ рад/с}$	$\omega_{\text{макс}}$	ω_0	$\omega_{\text{н}}$	$\omega_{\text{к}}$	0	$\omega = \pm\infty$
$I_{1i}, \text{ А}$	$I_{1\text{макс}}$	I_0	$I_{1\text{н}}$	$I_{1\text{к}}$	$I_{1\text{п}}$	$I_{1\text{гр}}$

$S_i, \text{ в.о.}$	-1,27	0	0,051	0,301	1	$\pm\infty$
$I'_{2i}, \text{ А}$	89,8	0	12,7	52	76,6	86,7
$\omega_i, \text{ рад/с}$	237,7	104,7	99,4	73,2	0	$\mp\infty$
$I_{1i}, \text{ А}$	95,2	5,37	18	57,4	82	92,1

За результатами розрахунків будемо природну електромеханічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$ (рисунок 5).

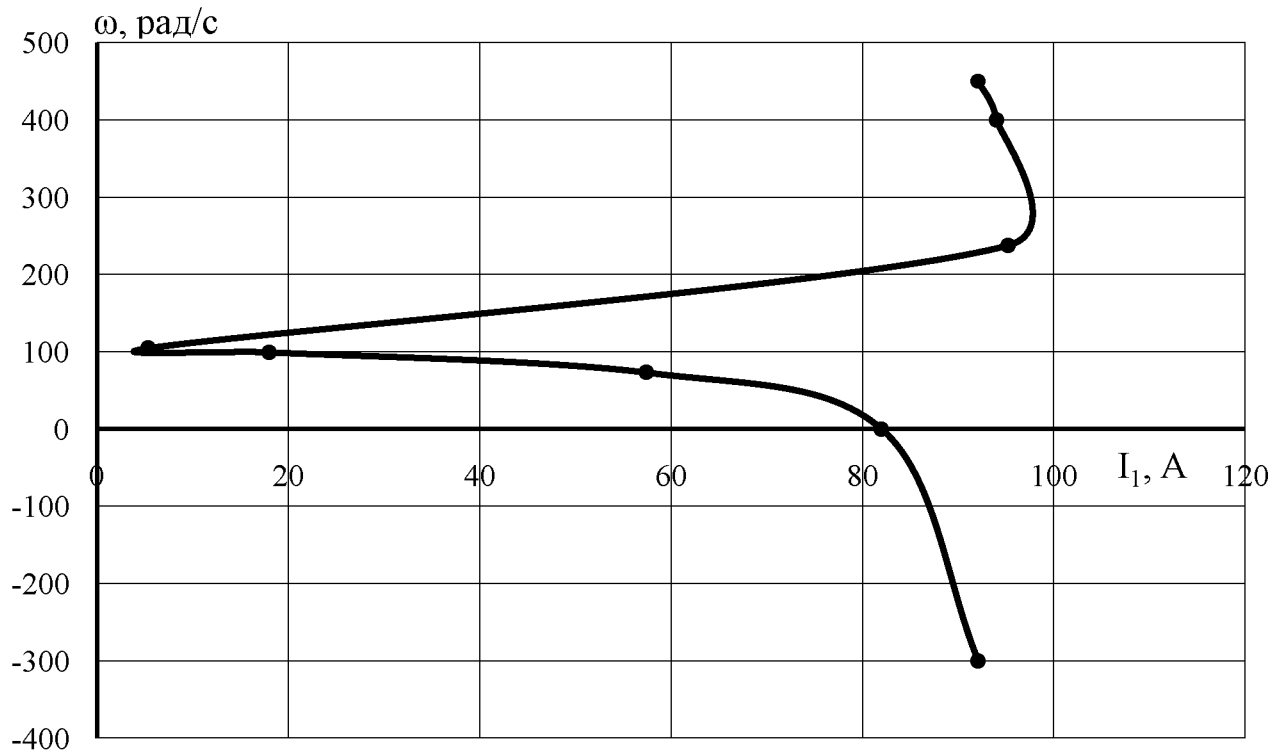


Рисунок 5 – Електромеханічна характеристика $\omega = f_2(I_1)$ за струмом статора асинхронного електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3

7.2 Для заданого електродвигуна типу 4AK160S6Y3 з фазним ротором розраховуємо природну механічну характеристику.

Розрахуємо основні точки природної механічної характеристики:

– синхронна кутова швидкість

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Момент двигуна при синхронній кутовій швидкості ω_0 дорівнює $M = 0$;

– номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}.$$

Номінальну кутову швидкість, яка відповідає номінальному ковзанню, визначаємо за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{н}});$$

$$\omega_{\text{н}} = 104,7 \cdot (1 - 0,051) = 99,4 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{99,4} = 75,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– критичний (максимальний) момент двигуна

$$M_{\text{к}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{к}},$$

де $\mu_{\text{к}}$ – кратність максимального моменту двигуна, в.о.

За паспортними даними двигуна типу 4АК160S6У3 $\mu_{\text{к}} = 3,5$. Отже

$$M_{\text{к}} = 75,5 \cdot 3,5 = 264,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичну кутову швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначаємо за формулою

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{к}});$$

$$\omega_{\text{к}} = 104,7 \cdot (1 - 0,301) = 73,2 \text{ рад/с}.$$

За відсутністю в паспортних даних електродвигуна відомостей про кратність пускового моменту його можна визначити за формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + aS_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2aS_{\text{к}}},$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до

приведеного активного опору обмотки ротора, в.о.;

R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R'_2 – приведений активний опір кола ротора, Ом;

S – поточне ковзання, в.о.;

$S_{\text{к}}$ – критичне значення ковзання, в.о.

$$a = \frac{0,66}{0,84} = 0,786.$$

В момент пуску електродвигуна $S = 1$. Отже

$$M_{\pi} = \frac{2 \cdot 264,2 \cdot (1 + 0,786 \cdot 0,301)}{\frac{1}{0,301} + \frac{0,301}{1} + 2 \cdot 0,786 \cdot 0,301} = 159,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За розрахованими значеннями моменту і кутової швидкості будуюмо природну механічну характеристику $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$ (рисунок 6).

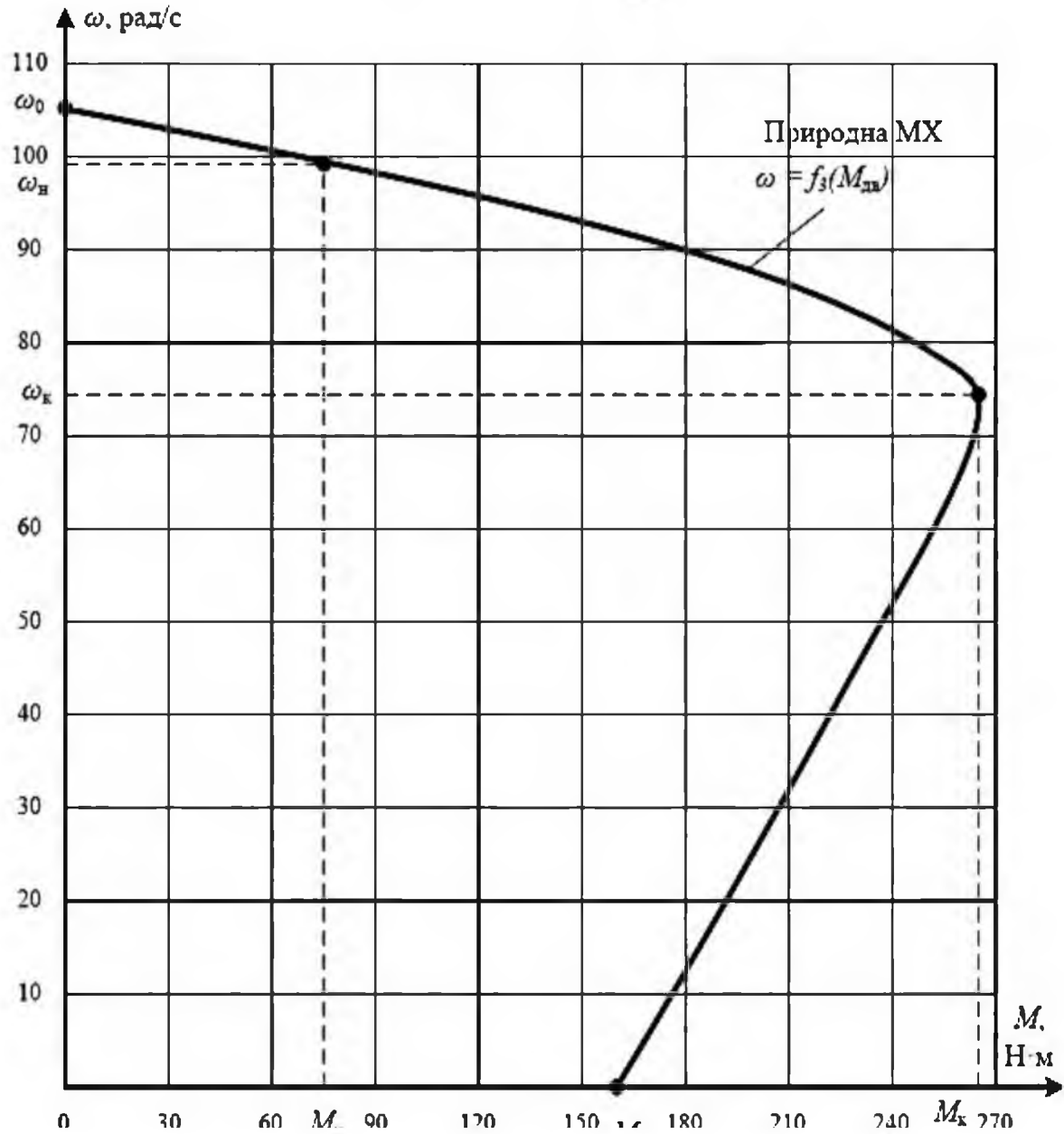


Рисунок 6 – Природна механічна характеристика $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$
АД з фазним ротором типу 4AK160S6Y3

7.3 Для заданого електродвигуна типу 4AK160S6Y3 з фазним ротором розрахуємо штучну механічну характеристику при введенні в коло ротора додаткового активного опору $\ddot{R}_{2\text{д}} = 0,1$ при номінальній напрузі і номінальній частоті мережі.

При введенні в коло ротора активного опору базові величини $U_{1н}$, $f_{1н}$ залишаються незмінними.

Проведемо розрахунок основних точок штучної механічної характеристики:

– синхронна кутова швидкість

$$\omega_{0шт} = \omega_{0пр} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

– критичне ковзання

$$S_{кшт} = S_{кпр} \cdot \frac{R'_2 + R'_{2д}}{R'_2},$$

де $R'_{2д}$ – приведений опір додаткового опору.

$$R'_{2д} = R_{2д} \cdot K_E^2$$

де K_E – коефіцієнт трансформації ЕРС.

$$K_E \approx 0,95 \cdot \frac{U_{лн}}{E_{2к}},$$

де 0,95 – коефіцієнт, що враховує 5 % втрату напруги в обмотці статора;

$U_{лн}$ – номінальна лінійна напруга статора, $U_{лн} = 380 \text{ В}$;

$E_{2к}$ – ЕРС між кільцями нерухомого фазного ротора, В. За паспортними даними двигуна $E_{2к} = 300 \text{ В}$.

$$K_E^2 \approx \left(0,95 \cdot \frac{U_{лн}}{E_{2к}} \right)^2;$$

$$K_E^2 \approx \left(0,95 \cdot \frac{380}{300} \right)^2 = 1,45.$$

Додатковий опір визначаємо за формулою

$$R_{2д} = \ddot{R}_{2д} \cdot R_{2н};$$

де $\ddot{R}_{2д}$ – додатковий активний опір роторного кола, в.о. Згідно завдання

$$\ddot{R}_{2д} = 0,1, \text{ в.о.};$$

$R_{2н}$ – номінальний опір роторного кола, Ом.

$$R_{2н} = \frac{E_{2к}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}},$$

де $I_{2н}$ – номінальний струм ротора, А. За паспортними даними $I_{2н} = 18$ А.

$$R_{2н} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 18} = 9,62 \text{ Ом};$$

$$R_{2д} = 0,1 \cdot 9,62 = 0,962 \text{ Ом};$$

$$R'_{2д} = 0,962 \cdot 1,45 = 1,395 \text{ Ом};$$

$$S_{кшт} = 0,301 \cdot \frac{0,84 + 1,395}{0,84} = 0,801;$$

– критична кутова швидкість $\omega_{кшт} = \omega_0 \cdot (1 - S_{кшт})$;

$$\omega_{кшт} = 104,7 \cdot (1 - 0,801) = 20,8 \text{ рад/с};$$

– критичний момент $M_{кшт} = M_{кпр} = 264,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

– номінальне ковзання

$$S_{ншт} = S_{нпр} \cdot \frac{R'_2 + R'_{2д}}{R'_2};$$

$$S_{ншт} = 0,051 \cdot \frac{0,84 + 1,395}{0,84} = 0,136 \text{ в.о.};$$

– номінальна кутова швидкість

$$\omega_{ншт} = \omega_0 \cdot (1 - S_{ншт});$$

$$\omega_{ншт} = 104,7 \cdot (1 - 0,136) = 90,5 \text{ рад/с};$$

– номінальний момент

$$M_{ншт} = M_{нпр} = 75,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– ковзання при пуску дорівнює $S_{п} = 1$;

– пусковий момент знаходимо за формулою

$$M_{\text{п шт}} = \frac{2M_{\text{к шт}} \cdot (1 + a_{\text{шт}} S_{\text{к шт}})}{\frac{S}{S_{\text{к шт}}} + \frac{S_{\text{к шт}}}{S} + 2a_{\text{шт}} S_{\text{к шт}}},$$

де

$$a = \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2\text{д}}} = \frac{0,66}{0,84 + 1,395} = 0,295.$$

Ковзання при пуску $S_{\text{п}} = 1$. Отже

$$M_{\text{п шт}} = \frac{2 \cdot 264,2 \cdot (1 + 0,295 \cdot 0,801)}{\frac{1}{0,801} + \frac{0,801}{1} + 2 \cdot 0,295 \cdot 0,801} = 220,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За розрахованими точками:

1 точка $S = 0(\omega_0)$, $M = 0$; 2 точка $S_{\text{н шт}}(\omega_{\text{н шт}})$, $M_{\text{н шт}} = M_{\text{н пр}}$;

3 точка $S_{\text{к шт}}(\omega_{\text{к шт}})$, $M_{\text{к пр}}$; 4 точка $S_{\text{п}}(\omega = 0)$, $M_{\text{п шт}}$

будуємо штучну механічну характеристику $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ при введенні в коло ротора додаткового активного опору (рисунок 7).

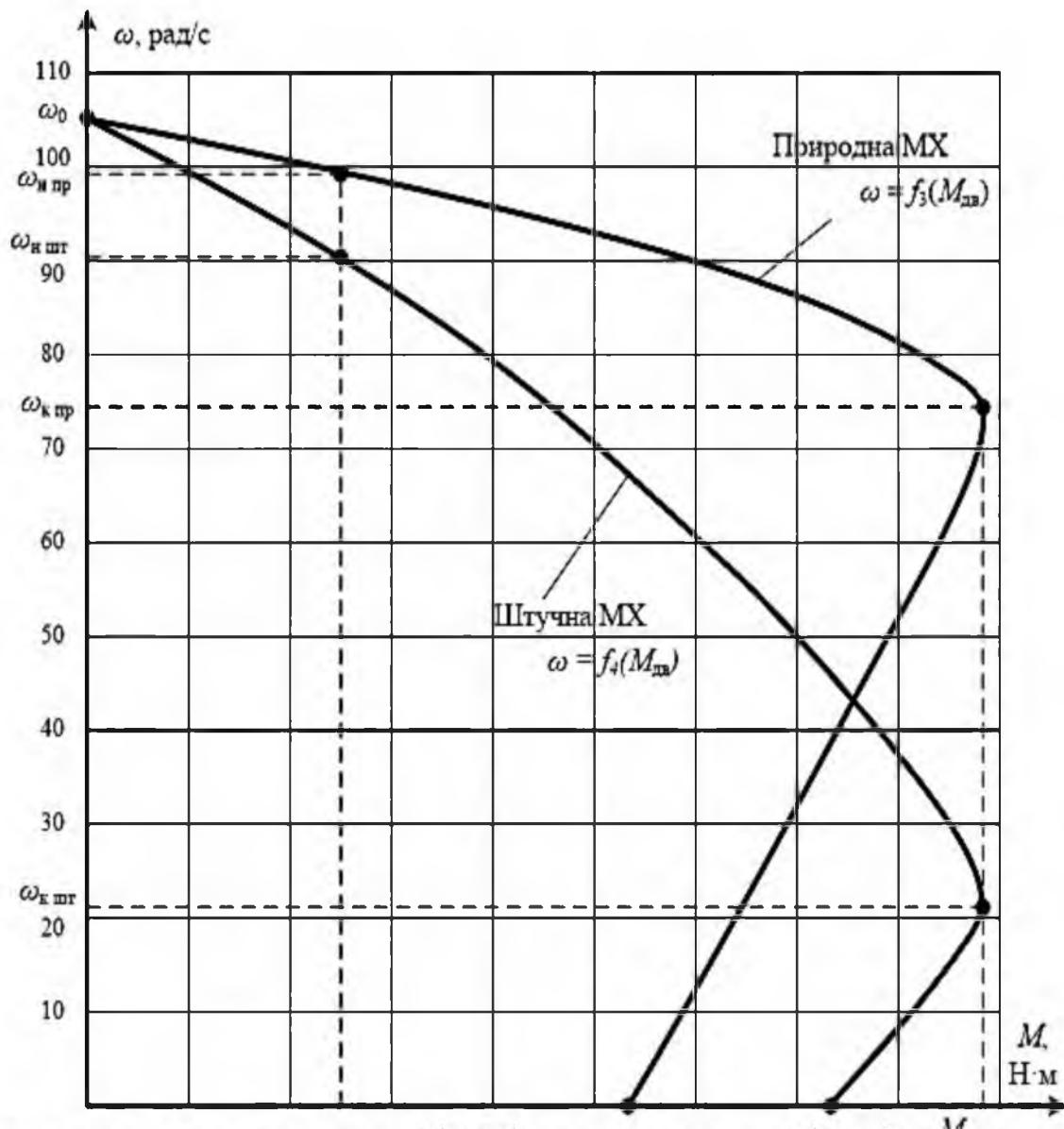


Рисунок 7 – Природна $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$ та штучна $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ механічні характеристики АД з фазним ротором

при введенні в коло ротора додаткового активного опору

7.4 Розрахуємо та побудуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі на 10 %, коли $\dot{R}_{2\text{д}} = 0$, $f_{1\text{н}} = 50$ Гц.

Порядок розрахунку аналогічний п. 7.3:

– синхронна кутова швидкість

$$\omega_{0\text{пр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \omega_{0\text{шт}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

– критичне ковзання не залежить від напруги $S_{\text{к шт}} = S_{\text{к пр}}$;

– критичний момент залежить від напруги і визначається за формулою

$$M_{\text{к шт}} = M_{\text{к пр}} \cdot \left(\frac{U_{\text{шт}}}{U_{\text{лн}}} \right)^2,$$

де $U_{\text{шт}} = 0,9 \cdot U_{\text{лн}}$, оскільки за умовою задачі напругу знижено на 10 %.

$$M_{\text{к шт}} = 264,2 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 220}{220} \right)^2 = 264,2 \cdot 0,81 = 214 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– номінальний момент при номінальному ковзанні $S_{\text{н}} = 0,051$ дорівнює

$$M_{\text{н шт}} = M_{\text{н пр}} \cdot \left(\frac{U_{\text{шт}}}{U_{\text{лн}}} \right)^2,$$

$$M_{\text{н шт}} = 75,5 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 220}{220} \right)^2 = 75,5 \cdot 0,81 = 61,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– пусковий момент знаходимо за формулою

$$M_{\text{п шт}} = M_{\text{п пр}} \cdot \left(\frac{U_{\text{шт}}}{U_{\text{лн}}} \right)^2,$$

$$M_{\text{п шт}} = 159,5 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 220}{220} \right)^2 = 159,5 \cdot 0,81 = 129,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За розрахованими точками:

1 точка $S = 0(\omega_0)$, $M = 0$; 2 точка $S_{\text{н пр}}(\omega_{\text{н пр}})$, $M_{\text{н шт}}$;
3 точка $S_{\text{к пр}}(\omega_{\text{к пр}})$, $M_{\text{к шт}}$; 4 точка $S_{\text{п}}(\omega = 0)$, $M_{\text{п шт}}$

будуємо штучну механічну характеристику $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ при зниженні напруги на статорі (рисунок 8).

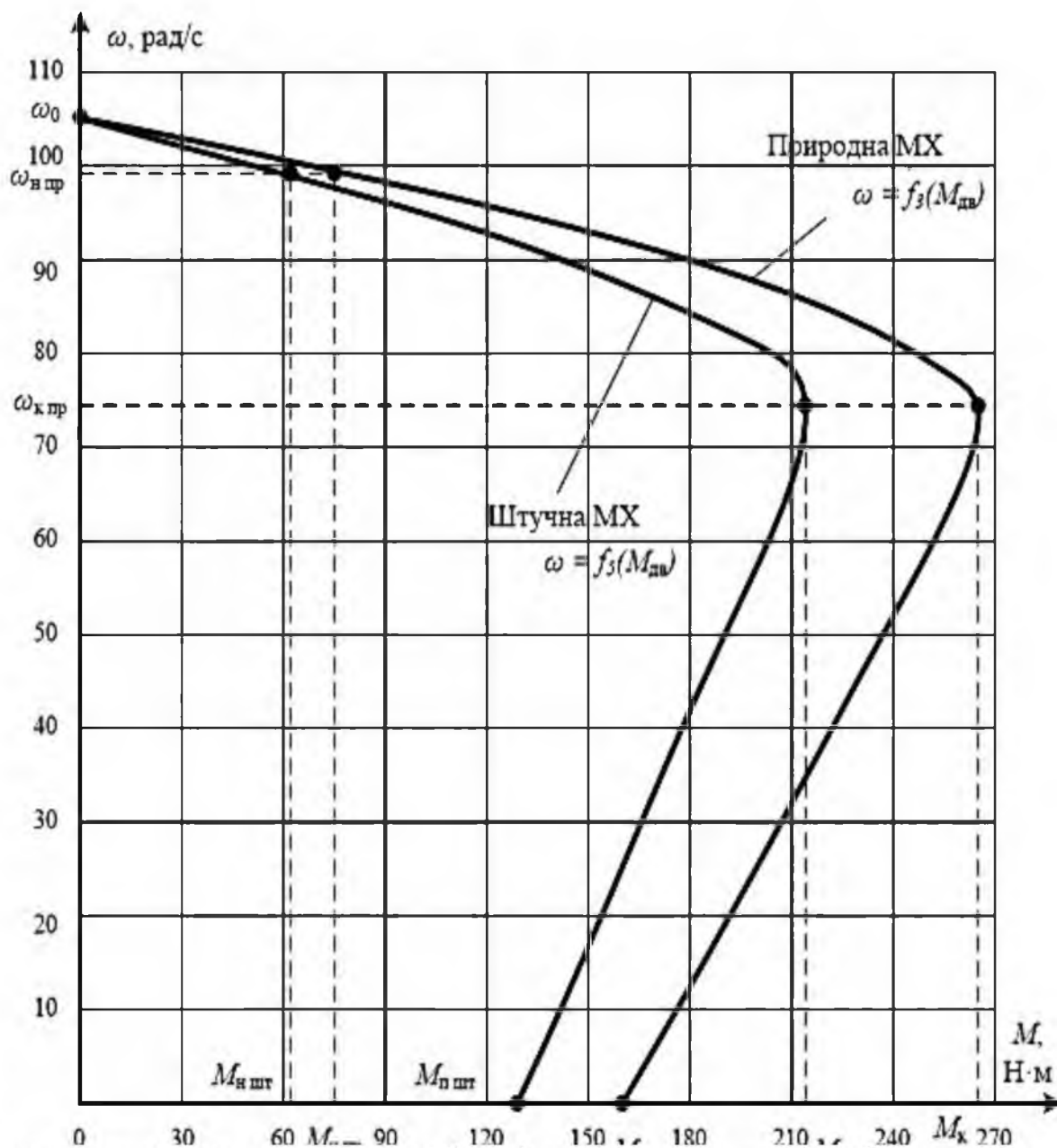


Рисунок 8 – Природна $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$ та штучна $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ механічні характеристики АД з фазним ротором при зниженні напруги на статорі

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Таблиці з результатами розрахунків.

4 Природні електромеханічні характеристики асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом ротора $\omega = f_1(I'_2)$ та за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$.

5 Природну механічну характеристику $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

6 Штучну механічну характеристику $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при введенні в коло ротора активного опору.

7 Штучну механічну характеристику $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі.

8 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

1 Що називається електро механічною та механічною характеристиками асинхронного електродвигуна (АД)?

2 Що називається природною та штучною характеристиками АД?

3 Як визначається синхронна кутова швидкість АД?

4 Як за каталоговими даними визначити номінальний момент на валу АД?

5 Як за каталоговими даними визначити номінальну кутову швидкість АД?

6 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна і як його визначити?

7 Як розрахувати значення ковзання при максимальному моменті на валу АД?

8 Що таке максимальний момент та яким чином його можна розраховувати за каталожними даними електродвигуна?

9 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні АД?

10 Як залежить момент асинхронного електродвигуна від величини підведеної до нього напруги?

11 Які характерні точки можна позначити на природній механічній характеристиці асинхронного електродвигуна?

12 Наведіть аналітичну і графічну залежність струму статора від кутової швидкості ротора. Як називається така залежність?

13 Яких значень може досягати кратність пускового струму при прямому включенні асинхронного електродвигуна в мережу?

14 Вкажіть способи зниження величини струму статора при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

15 Наведіть способи зменшення пускового струму і збільшення пускового моменту при пуску асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

16 Як залежить максимальний момент від опору кола ротора?

17 Як залежать від опору кола ротора асинхронного двигуна пусковий момент і пусковий струм?

18 Який вигляд мають штучні механічні характеристики АД з фазним ротором при введенні в коло ротора додаткового активного опору?

19 Який вигляд мають штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі?

20 Як можна зменшити пусковий струм і збільшити пусковий момент АД з фазним ротором?