

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет автоматики та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ

Методичні вказівки до виконання курсової роботи
з курсу: «Мехатронні системи» для студентів спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Кропивницький 2021

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет автоматики та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ

Методичні вказівки до виконання курсової роботи
з курсу: «Мехатронні системи» для студентів спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Затверджена
на засіданні кафедри АВП
протокол № 5 від 01.11.2021

Кропивницький 2021

Мехатронні системи. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»/ Укл. : В.А. Зозуля, І.А. Березюк, А.М. Мацуй.- Кропивницький: ЦНТУ, 2021. – 48с.

Укладачі: В.А. Зозуля - к.т.н, доцент кафедри АВП

А.М. Мацуй - к.т.н, доцент кафедри АВП

І.А. Березюк – к.т.н, старший викладач кафедри АВП

Рецензент: С.І. Осадчий– д.т.н., проф. АВП

Центральноукраїнський національний технічний університет, 2021р.

Зміст

1. Загальні методичні рекомендації.....	5
2 Завдання на курсову роботу	5
3. Зміст курсової роботи	9
4 Об'єм і вимоги до оформлення курсового проекту	9
5 Методичний приклад виконання курсової роботи	11
5. 1 Розрахунок основних зусиль, моментів, діючих в системі.....	12
5.2 Розрахунок потужності двигуна скіпового підйомника	13
5.3 Вибір двигуна.	15
5.4 Розрахунок і моделювання системи підлеглого керування електроприводом постійного струму з тиристорним перетворювачем.	19
5.4.1 Розрахунок основних параметрів двигуна	19
5.4.2 Оптимізація контуру струму якоря.	23
5.4.3 Оптимізація контуру швидкості.	26
5.4.4 Моделювання системи керування з використанням Simulink.	31
5.4.5 Аналіз та моделювання системи керування з використанням пакету Control System Toolbox.....	35
5.5 Розрахунок випрямляча джерела живлення.	45
Список використаної літератури.	48

1. Загальні методичні рекомендації

Мета і призначення курсового проектування

Курсова робота з дисципліни "Мехатронні системи" завершує теоретичне навчання студентів бакалаврів в області розробки та впровадження мехатронних систем.

Мета роботи - закріплення і поглиблення теоретичного матеріалу курсу, а також підготовка студентів до самостійного і творчого рішення інженерних завдань, як в період дипломного проектування, так і в подальшій практичній діяльності.

Призначення роботи - практичне освоєння методів розрахунку та моделювання мехатронних систем.

2 Завдання на курсову роботу

Завданням курсової роботи є розробка системи керування електроприводом скіпового підйомника похилої шахти.

Скіповий підйомник – це установка для транспортування сипучих і дрібних вантажів, корисних копалин або гірської породи, в скіпах по рейкових шляхах з горизонтів кар'єра, розташованих нижче 150-200 м. Скіповий підйомник відноситься до комбінованих видів кар'єрного транспорту. Скіпові підйомники знайшли широке застосування в гірничодобувній, металургійній та будівельній промисловості, вони служать для підйому на поверхню вугілля, руди та інших корисних копалин. У будівельній промисловості скіпові підйомники найчастіше служать для подачі заповнювачів бетонної суміші.

Конструкція скіпових підйомників дозволяє легко проводити дозування сипучих вантажів за обсягом. Фактично, можна говорити про те, що скіпові підйомники можуть знайти своє застосування в будь-якому технологічному процесі.

Рух скіпового підйомника забезпечується за допомогою електричного приводу.

Електричний привід (скорочено – електропривод) – це електромеханічна система, що складається з перетворювачів електроенергії, електромеханічних та механічних перетворювачів, керуючих та інформаційних пристроїв і пристроїв сполучення з зовнішніми електричними, механічними, керівниками й інформаційними системами, що призначені для приведення в рух виконавчих органів робочої машини та управління цим рухом з метою здійснення технологічного процесу. Функціональну схему скіпового підйомника показано на рисунку 2.1

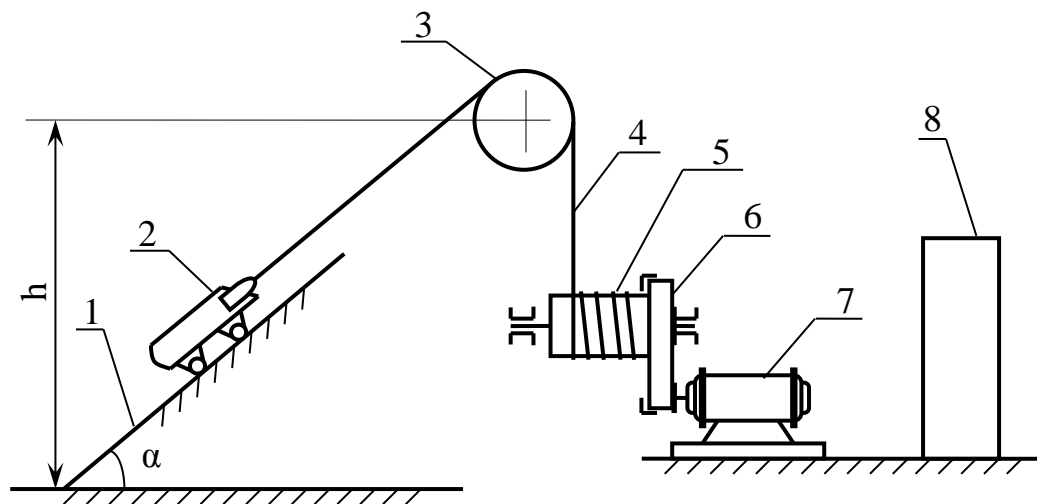


Рис. 2.1 Функціональна схема скіпового підйомника.

- 1 – рельсове полотно;
- 2 – скіп;
- 3 – направляюче колесо;
- 4 – канат;
- 5 – барабан;
- 6 – редуктор;
- 7 – електродвигун;
- 8 – щит керування.

Вихідні дані:

- 1) Маса вантажу m , [кг];
- 2) Вага скіпа $G_{ск}$, [Н];
- 3) Діаметр колеса скіпа $D_{ск}$, [м];
- 4) Діаметр цапфи осей коліс $D_{ц}$, [м];
- 5) Висота підйому h , [м];
- 6) Швидкість підйому скіпа $V_{п}$, [м/с];
- 7) Швидкість спуску скіпа $V_{с}$, [м/с];
- 8) Швидкість обертання двигуна $n_{д}$, [об/хв];
- 9) Час пауз після спуску і підйому t_0 , [с];
- 10) Коефіцієнт тертя в цапфі μ ;
- 11) Коефіцієнт тертя кочення колеса по рельсі f , [см];
- 12) Коефіцієнт, що враховує тертя реборда колеса по рельсі K ;
- 13) Кут нахилу рельсового полотна α ;
- 14) ККД барабана і передачі η ;
- 15) Приведений до валу двигуна маховий момент, обумовлений масами барабана, направляючого колеса, каната і редуктора складає GD^2 , [кг · см²];
- 16) Час перехідного процесу замкнутої системи $t_{пп}$, [с];
- 17) Перерегулювання σ , [%] ;
- 18) Схема керування приводом транзисторний ШІМ або тиристорний перетворювач.

Варіанти завдань наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Варіанти завдань

№ вар.	m , [кг]	$G_{\text{ск}}$, [Н];	$D_{\text{ск}}$, [м];	$D_{\text{ц}}$, [м]	h , [м]	$V_{\text{п}}$, [м/с]	$V_{\text{с}}$, [м/с]	$n_{\text{д}}$, [об /хв]	t_0 , [с]	μ	f , [см]	K	α	η	GD^2 , [кг · см ²]	$t_{\text{пп}}$, [с]	σ , [%]	Схема керування
1	190	2200	0,2	0,05	85	2,1	2,2	1500	20	0,1	0,06	1,35	45	0,93	2,1	0,15	50-60	ШІМ
2	190	2400	0,2	0,05	80	1,9	2,02	1450	20	0,1	0,06	1,35	45	0,93	2,0	0,20	40-50	ТП
3	180	1900	0,25	0,06	70	2,4	2,5	1550	25	0,1	0,06	1,35	40	0,94	2,1	0,20	25-30	ШІМ
4	180	1950	0,25	0,06	73	2,3	2,4	1550	25	0,1	0,06	1,35	40	0,94	2,0	0,15	50-60	ТП
5	200	2100	0,3	0,07	75	2,2	2,3	1600	30	0,1	0,06	1,35	50	0,92	2,1	0,15	40-50	ШІМ
6	200	2100	0,3	0,07	76	2,2	2,3	1600	30	0,1	0,06	1,35	50	0,92	2,0	0,20	25-30	ТП
7	210	1950	0,26	0,05	65	2,5	2,6	1550	20	0,1	0,06	1,35	45	0,94	2,1	0,20	50-60	ШІМ
8	210	1950	0,26	0,05	64	2,4	2,5	1550	20	0,1	0,06	1,35	45	0,93	2,0	0,15	40-50	ТП
9	170	2250	0,24	0,06	85	2,0	2,1	1450	25	0,1	0,06	1,35	40	0,92	2,1	0,15	25-30	ШІМ
10	170	2150	0,24	0,06	86	2,1	2,2	1450	25	0,1	0,06	1,35	40	0,93	2,0	0,20	50-60	ТП
11	190	2050	0,27	0,07	80	2,2	2,3	1600	30	0,1	0,06	1,35	50	0,93	2,1	0,20	40-50	ШІМ
12	190	2150	0,28	0,07	82	2,5	2,6	1600	30	0,1	0,06	1,35	50	0,92	2,0	0,15	25-30	ТП
13	180	2100	0,28	0,05	70	2,0	2,1	1450	20	0,1	0,06	1,35	45	0,95	2,1	0,15	50-60	ШІМ
14	180	2000	0,27	0,05	73	2,0	2,1	1450	20	0,1	0,06	1,35	45	0,94	2,0	0,20	40-50	ТП
15	200	2050	0,29	0,06	75	2,2	2,3	1550	25	0,1	0,06	1,35	40	0,94	2,1	0,20	25-30	ШІМ
16	200	2000	0,23	0,06	74	2,2	2,3	1550	25	0,1	0,06	1,35	40	0,95	2,0	0,15	50-60	ТП
17	210	1900	0,23	0,07	65	2,3	2,4	1600	30	0,1	0,06	1,35	50	0,92	2,1	0,15	40-50	ШІМ
18	210	1950	0,26	0,07	66	2,2	2,3	1600	30	0,1	0,06	1,35	50	0,94	2,0	0,20	25-30	ТП
19	170	2050	0,25	0,06	85	2,0	2,1	1500	20	0,1	0,06	1,35	45	0,93	2,1	0,20	50-60	ШІМ
20	170	2000	0,24	0,06	86	2,1	2,2	1500	20	0,1	0,06	1,35	45	0,92	2,0	0,15	40-50	ТП

3. Зміст курсової роботи

Пояснювальна записка складається з наступних частин:

1. Титульний аркуш, який оформлюється відповідно до вимог ГОСТ 2.105-79. Вважається першим аркушем пояснювальної записки (ПЗ).

2. Зміст є другим аркушем ПЗ, виконується на листі формату А4 з основним написом по ГОСТ 2.104-68.

3. Вступ; основна частина, що включає: розрахунок основних зусиль, моментів, діючих в системі; розрахунок і моделювання системи підлеглого керування електроприводом постійного струму, проектування електричної принципової схеми керування електроприводом постійного струму з тиристорним перетворювачем або широтно – імпульсним перетворювачем (залежно від варіанту), висновок; перелік використаної літератури; застосування (лістинг програм).

Якщо в тексті прийнята спеціальна термінологія, то у кінці перед списком літератури має бути приведений перелік прийнятих термінів з відповідними роз'ясненнями. Перелік також включають в зміст роботи.

4. Нумерація листів ПЗ і застосування наскрізна. Усі застосування з вказівкою їх номерів і заголовків мають бути перераховані в змісті.

4 Об'єм і вимоги до оформлення курсового проекту

Курсовий проект виконується у вигляді рукописної (машинописною) записки пояснення загальним об'ємом 25 - 30 стор. стандартного формату А4 (297(210мм) ГОСТ 2.301-68. На форматі роблять рамку, віддалену від лінії відрізу формату на 20 мм ліворуч і 5 мм з інших сторін. Усередині рамки виконується напис по формах 2 або 2а по ГОСТ 2.104-79. Відстань від внутрішньої рамки до меж тексту слід залишати: на початку рядків - не менше 5

мм, у кінці рядків - не менше 3 мм. Відстань від верхнього або нижнього рядка тексту до верхньої або нижньої рамки - не менше 10 мм.

Писати слід тільки на одній стороні листа. Титульний аркуш виконується відповідно до ГОСТ 2.105-79.

Абзаци в тексті слід починати з відступом від лівої межі тексту на 15 - 17 мм. Текст документу розділяють на розділи і підрозділи, а при необхідності на пункти і підпункти.

Порядок побудови розділів і підрозділів, правила викладу тексту, розрахунків, а також побудови таблиць повинні відповідати ГОСТ 2.105-79. Загальні вимоги до текстових документів і ГОСТ 7.32-81. Звіт про науково - дослідницькій роботі.

Основні графічні матеріали наводяться на двох аркушах формату А1 з основним написом по ГОСТ 2.104-68.

5 Методичний приклад виконання курсової роботи

Вихідні дані:

- 19) Маса вантажу $m = 190$ [кг];
- 20) Вага скіпа $G_{\text{ск}} = 2400$ [Н];
- 21) Діаметр колеса скіпа $D_{\text{ск}} = 0.2$ [м];
- 22) Діаметр цапфи осей коліс $D_{\text{ц}} = 0.05$ [м];
- 23) Висота підйому $h = 80$ [м];
- 24) Швидкість підйому скіпа $V_{\text{п}} = 1.9$ [м/с];
- 25) Швидкість спуску скіпа $V_{\text{с}} = 2.02$ [м/с];
- 26) Швидкість обертання двигуна $n_{\text{д}} = 1450$ [об/хв];
- 27) Час пауз після спуску і підйому $t_0 = 20$ [с];
- 28) Коефіцієнт тертя в цапфі $\mu = 0.1$;
- 29) Коефіцієнт тертя кочення колеса по рельсі $f = 0.06$ [см];
- 30) Коефіцієнт, що враховує тертя реборда колеса по рельсі $K = 1.35$;
- 31) Кут нахилу рельсового полотна $\alpha = 45^\circ$;
- 32) ККД барабана і передачі $\eta = 0.93$;
- 33) Приведений до валу двигуна маховий момент, обумовлений масами барабана, направляючого колеса, каната і редуктора складає $GD^2 = 2$ [кг · см²];
- 34) Час перехідного процесу замкнутої системи $t_{\text{пп}} = 0.2$ [с];
- 35) Перерегулювання $\sigma = 40 - 50$ [%] ;
- 36) В якості підсилювально-перетворюючого пристрою застосувати тиристорний перетворювач з керуванням від ЕОМ (контролера) або іншого програмуючого пристрою, що задає режим роботи електроприводу скіпового підйомника.

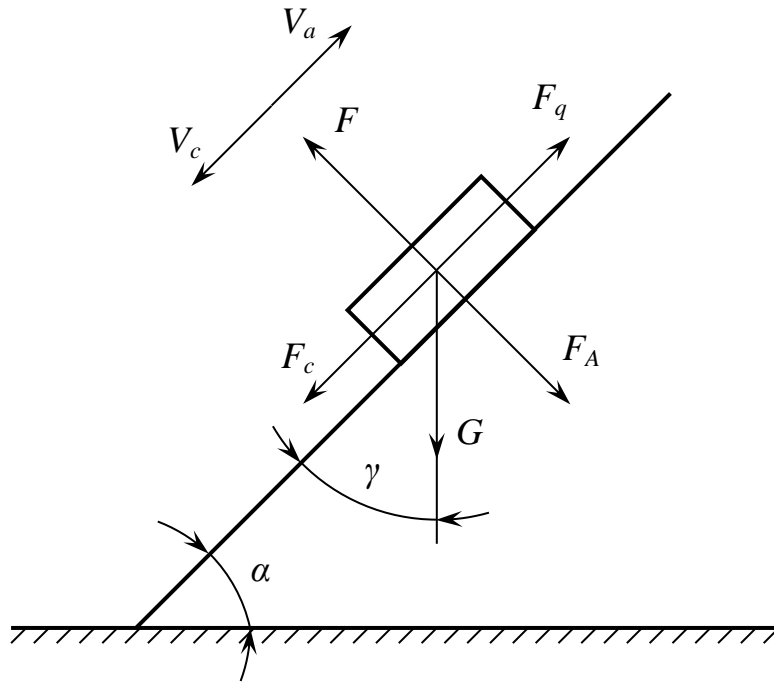


Рис. 5.1. Сили, що діють на скіп.

5. 1 Розрахунок основних зусиль, моментів, діючих в системі.

Сила, що діє на канат, обумовлена вагою скіпа з вантажем:

$$F_{\text{кан}} = G \cdot \sin \alpha = (2400 + 190 \cdot 9.81) \cdot \sin 45^\circ = 3015 \text{ [H]};$$

де α – кут нахилу; G – вага скіпа з вантажем:

$$G = G_{\text{ск}} + m \cdot g = 2400 + 190 \cdot 9.81 = 4263.9 \text{ [H]};$$

Сила, що діє на колеса скіпа:

$$F_{\text{кол}} = G \cdot \cos \alpha = 4263.9 \cdot \sin 45^\circ = 3015 \text{ [H]};$$

Сила, що діє на канат, обумовлена тертям реборд і колес по рельсах та тертям в цапфах колес:

$$F_{\text{тр}} = K \cdot \frac{F_{\text{кол}}}{R_k} (\mu \cdot r_{\text{ц}} + f) = 1.35 \cdot \frac{3015}{0.2 \cdot \frac{100}{2}} \left(0.1 \cdot 0.05 \cdot \frac{100}{2} + 0.06 \right) \approx 126.18 \text{ [H]};$$

де K – коефіцієнт, що враховує тертя реборди колеса по рельсі; R_k – радіус колеса, [см]; μ – коефіцієнт тертя в цапфі; $r_{\text{ц}}$ – радіус цапфи, [см]; f – коефіцієнт тертя кочення колеса по рельсі, [см].

Сумарна сила, що діє на канат:

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{кан}} + F_{\text{тр}} = 3015 + 126.18 = 3141.18 \text{ [Н]};$$

Приведений до вала двигуна статичний момент:

$$M_{\text{с}} = F_{\text{тяги}} \cdot \frac{V_{\text{п}}}{\omega_{\text{д}}} \cdot \frac{1}{\eta} = 3141.18 \cdot \frac{1.9}{151.84} \cdot \frac{1}{0.93} = 42.26 \text{ [Н} \cdot \text{м]};$$

де $V_{\text{п}}$ – швидкість підйому, [м/с]; η – ККД; $\omega_{\text{д}}$ – кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_{\text{д}} = n_{\text{д}} \cdot \frac{2\pi}{60} = 1450 \cdot \frac{2 \cdot 3.14}{60} = 151.84 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right];$$

Приведений до вала двигуна момент інерції від поступально рухаючих ваг скіпа з вантажем:

$$J_n = \frac{G}{g} \cdot \left(\frac{V_{\text{п}}}{\omega_{\text{д}}} \right)^2 = \frac{4263.9}{9.81} \cdot \left(\frac{1.9}{151.84} \right)^2 \approx 0.068 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2];$$

Сумарний маховий момент скіпового підйомника, приведений до вала двигуна:

$$GD_{\Sigma}^2 = J_n \cdot 4 \cdot g + GD^2 = 0.068 \cdot 4 \cdot 9.81 + 2 \approx 4.67 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2];$$

5.2 Розрахунок потужності двигуна скіпового підйомника

Корисне зусилля в тросі при підйомі навантаженого скіпа:

$$F_{\text{пол}} = G \cdot \sin \alpha = 4263.9 \cdot \sin 45 = 3015 \text{ [Н]};$$

Додаткове зусилля, необхідне для подолання тертя кочення, складає:

$$F_{\text{кач}} = G \cdot \cos \left(\frac{f}{0.5 \cdot D_{\text{к}}} \right) = 4263.9 \cdot \frac{0.06}{0.5 \cdot 0.2 \cdot 100} \cdot \cos \alpha \approx 18.09 \text{ [Н]};$$

Додаткове зусилля, необхідне для подолання тертя ковзання в цапфах:

$$F_{\text{ск}} = G \cdot \mu \cdot \frac{D_{\text{ц}}}{D_{\text{к}}} = 4263.9 \cdot 0.1 \cdot \frac{0.05 \cdot 100}{0.2 \cdot 100} \approx 106.6 \text{ [Н]};$$

Додаткове зусилля в тросі, обумовлене тертям при підйомі скіпа з урахуванням тертя в ребордах:

$$F_{\text{тр}} = K \cdot (F_{\text{кач}} + F_{\text{ск}}) = 1.35 \cdot (18.09 + 106.6) = 168.33 \text{ [Н]};$$

Повне зусилля в тросі при підйомі вантажу:

$$F = F_{\text{пол}} + F_{\text{тр}} = 3015 + 168.33 = 3183.33 \text{ [Н]};$$

Потужність, що розвивається двигуном при підйомі:

$$P_{\text{п}} = \frac{F \cdot V_{\text{п}}}{1000 \cdot \eta} = \frac{3183.33 \cdot 1.9}{1000 \cdot 0.93} \approx 6.5 \text{ [кВт]};$$

Час підйому скіпа:

$$t_{\text{п}} = \frac{h}{V_{\text{п}} \cdot \sin \alpha} = \frac{80}{1.9 \cdot \sin 45^\circ} \approx 59.55 \text{ [с]};$$

Корисне зусилля в тросі при спуску порожнього скіпа:

$$F'_{\text{пол}} = -G_{\text{ск}} \cdot \sin \alpha = -2400 \cdot \sin 45^\circ \approx -1697.1 \text{ [Н]};$$

Зусилля, необхідне для подолання тертя кочення:

$$F'_{\text{кач}} = G_{\text{ск}} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{f}{0.5 \cdot D_{\text{ск}}} = 2400 \cdot \cos 45^\circ \cdot \frac{0.06}{0.5 \cdot 0.2 \cdot 100} \approx 10.18 \text{ [Н]};$$

Зусилля, необхідне для подолання тертя ковзання в цапфах:

$$F'_{\text{ск}} = G_{\text{ск}} \cdot \mu \cdot \frac{D_{\text{ц}}}{D_{\text{ск}}} = 2400 \cdot 0.1 \cdot \frac{0.05 \cdot 100}{0.2 \cdot 100} = 60 \text{ [Н]};$$

Зусилля в тросі, обумовлене тертям при спуску порожнього скіпа з урахуванням тертя в ребордах:

$$F'_{\text{тр}} = K \cdot (F'_{\text{кач}} + F'_{\text{ск}}) = 1.35 \cdot (10.18 + 60) \approx 94.75 \text{ [Н]};$$

Повне зусилля в тросі при спуску порожнього скіпа:

$$F' = F'_{\text{пол}} + F'_{\text{тр}} = -1697.1 + 94.75 = -1602.35 \text{ [Н]};$$

Потужність двигуна при спуску порожнього скіпа:

$$P_{\text{сп}} = \frac{F' \cdot V_{\text{с}} \cdot \eta}{1000} = \frac{-1602.35 \cdot 2.02 \cdot 0.93}{1000} \approx -3.01 \text{ [кВт]};$$

Час спуску порожнього скіпа:

$$t_{\text{с}} = \frac{h}{V_{\text{с}} \cdot \sin \alpha} = \frac{80}{2.02 \cdot \sin 45^\circ} \approx 56.01 \text{ [с]};$$

Графік потужності, що витрачається двигуном, зображено на рис. 1.5.2.

Еквівалентна потужність:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_{\text{п}}^2 \cdot t_{\text{п}} + P_{\text{сп}}^2 \cdot t_{\text{сп}}}{t_{\text{п}} + t_0 + t_{\text{сп}} + t_0}} = \sqrt{\frac{6.5^2 \cdot 59.99 + (-3.01)^2 \cdot 56.01}{59.99 + 20 + 56.01 + 20}} \approx 4.42 \text{ [кВт]};$$

Номінальна потужність двигуна:

$$P_{\text{н}} = 1.4 \cdot P_{\text{экв}} = 1.4 \cdot 4.42 \approx 6.17 \text{ [кВт]};$$

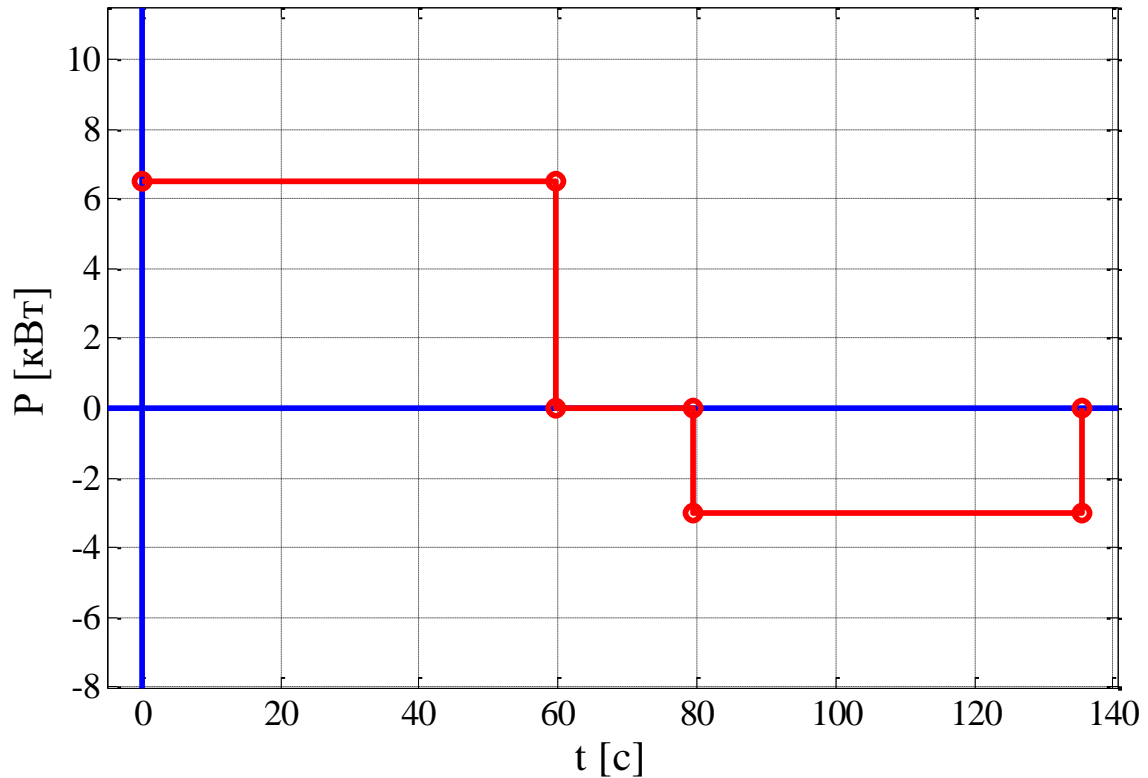


Рис. 5.2 . Графік потужності, що витрачається двигуном.

5.3 Вибір двигуна.

По розрахункам номінальної потужності обирається з довідника чотири двигуна:

1) Двигун типу АИРСМ132S6:

- номінальна потужність $P_{\text{н}} = 6.3 \text{ кВт};$
- номінальна частота обертання $n_{\text{н}} = 925 \frac{\text{об}}{\text{хв}};$
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0.81;$

2) Двигун типу 5АН(Ф)200МА6/24:

- номінальна потужність $P_{\text{н}} = 6.5 \text{ кВт};$
- номінальна частота обертання $n_{\text{н}} = 690 \frac{\text{об}}{\text{хв}};$

- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0.835$;

3) Двигун типу АИР132М6/4:

- номінальна потужність $P_H = 6.7$ кВт;

- номінальна частота обертання $n_H = 550 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$;

- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0.85$;

4) Двигун типу П-52:

- номінальна потужність $P_H = 8$ кВт;

- номінальна частота обертання $n_H = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$;

- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0.86$;

Визначення характеристик двигуна (розраховується для кожного двигуна):

- номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\Omega_{H1} = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3.14 \cdot 925}{30} \approx 96.87 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right];$$

$$\Omega_{H2} = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3.14 \cdot 715}{30} \approx 72.26 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right];$$

$$\Omega_{H3} = \frac{\pi \cdot n_3}{30} = \frac{3.14 \cdot 550}{30} \approx 57.59 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right];$$

$$\Omega_{H4} = \frac{\pi \cdot n_4}{30} = \frac{3.14 \cdot 1500}{30} \approx 157.01 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right];$$

де n – номінальна частота обертання двигуна;

- номінальний обертаючий момент двигуна:

$$M_{H1} = \frac{P_H}{\Omega_{H1} \cdot \eta_1} = \frac{6.17 \cdot 1000}{96.87 \cdot 0.81} \approx 80.3 [H \cdot m];$$

$$M_{H2} = \frac{P_H}{\Omega_{H2} \cdot \eta_2} = \frac{6.17 \cdot 1000}{72.26 \cdot 0.835} \approx 107.73 [H \cdot m];$$

$$M_{H3} = \frac{P_H}{\Omega_{H3} \cdot \eta_3} = \frac{6.17 \cdot 1000}{57.59 \cdot 0.85} \approx 136.86 [H \cdot m];$$

$$M_{H4} = \frac{P_H}{\Omega_{H4} \cdot \eta_4} = \frac{8 \cdot 1000}{157.01 \cdot 0.86} \approx 59.22 [H \cdot m];$$

Побудова характеристик виконується в координатах $\Omega(M)$, $P_{\text{енерг}}(M)$ (рис. 5.3).

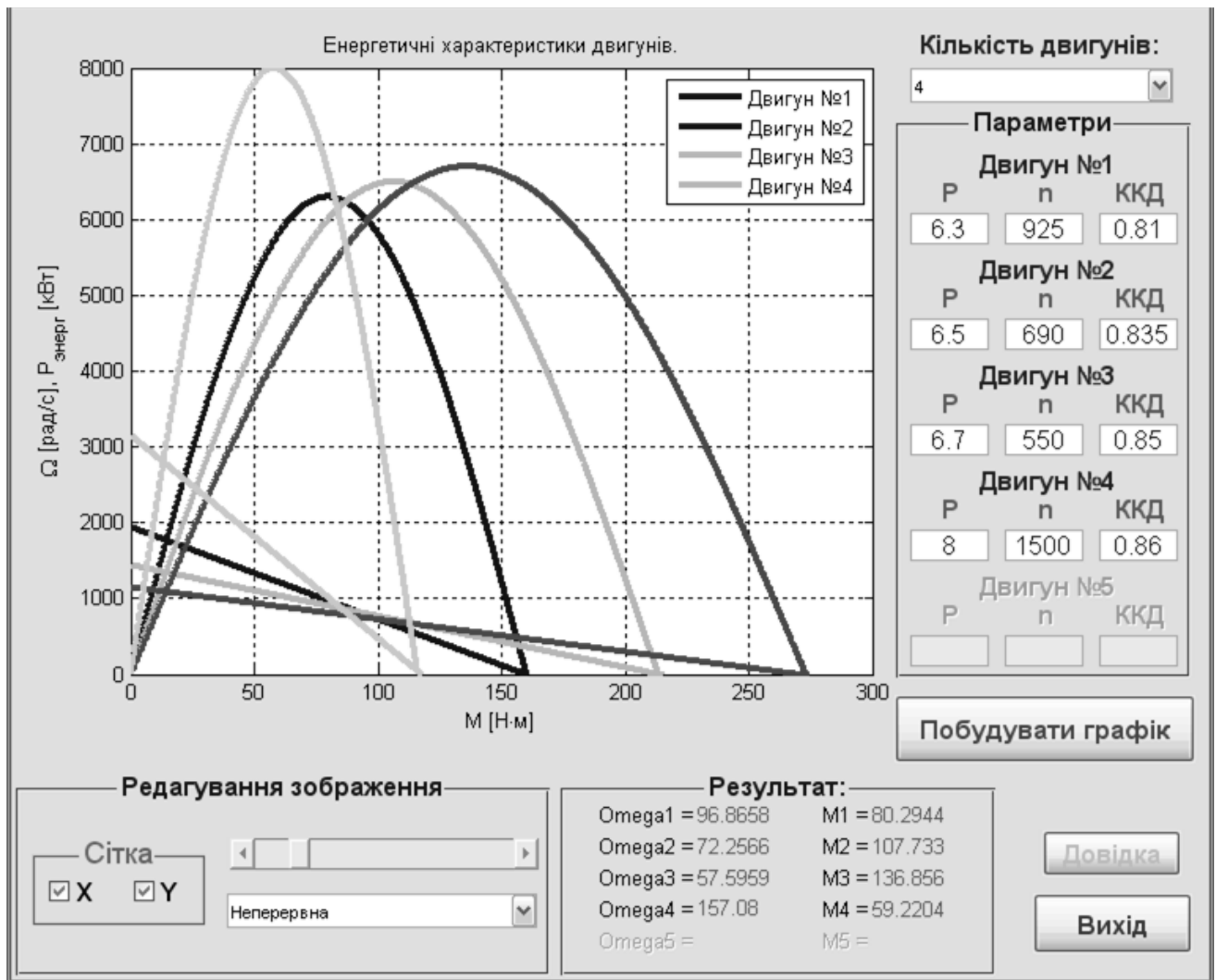


Рис. 5.3. Графіки енергетичних характеристик двигунів.

Визначення необхідних характеристик скіпа підйомника.

Необхідний момент для підйому завантаженого скіпа:

$$M_{\text{треб}} = G \cdot \frac{D_{\text{бар}}}{2} = 4263.9 \cdot \frac{0.42}{2} \approx 895.4 \text{ [Н} \cdot \text{м]};$$

де $D_{\text{бар}} = 0.4 \div 0.5$ м – діаметр барабану.

Необхідна кутова швидкість для підйому навантаженого скіпа:

$$\Omega_{\text{треб}} = \frac{2 \cdot V_{\text{п}}}{D_{\text{бар}}} = \frac{2 \cdot 1.9}{0.42} \approx 9.05 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right];$$

Розрахунок орієнтованого значення передаточного числа редуктора:

$$i'_{ред 1} = \frac{M_{треб}}{M_{н1}} = \frac{895.4}{80.3} \approx 11.15;$$

$$i'_{ред 2} = \frac{M_{треб}}{M_{н2}} = \frac{895.4}{107.73} \approx 8.3;$$

$$i'_{ред 3} = \frac{M_{треб}}{M_{н3}} = \frac{895.4}{136.86} \approx 6.5;$$

$$i'_{ред 4} = \frac{M_{треб}}{M_{н4}} = \frac{895.4}{59.22} \approx 15.12;$$

Визначення очікуваної лінійної швидкості з орієнтовним передаточним числом:

$$V'_{ред 1} = \frac{\Omega_{н1}}{i'_{ред 1}} \cdot \frac{D_{бар}}{2} = \frac{96.87}{11.15} \cdot \frac{0.42}{2} \approx 1.82 \left[\frac{м}{с} \right];$$

$$V'_{ред 2} = \frac{\Omega_{н2}}{i'_{ред 2}} \cdot \frac{D_{бар}}{2} = \frac{72.26}{8.3} \cdot \frac{0.42}{2} \approx 1.83 \left[\frac{м}{с} \right];$$

$$V'_{ред 3} = \frac{\Omega_{н3}}{i'_{ред 3}} \cdot \frac{D_{бар}}{2} = \frac{57.59}{6.5} \cdot \frac{0.42}{2} \approx 1.85 \left[\frac{м}{с} \right];$$

$$V'_{ред 4} = \frac{\Omega_{н4}}{i'_{ред 4}} \cdot \frac{D_{бар}}{2} = \frac{157.01}{15.12} \cdot \frac{0.42}{2} \approx 2.18 \left[\frac{м}{с} \right];$$

Оскільки значення четвертої лінійної швидкості, переміщення скіпа, більша за необхідну ($V'_{ред 4} > V_{п}$), то з цього можна зробити висновок, що двигун П–52 може використовуватись в цій системі.

Згідно параметрам двигуна П–52: орієнтоване значення передаточного числа редуктора $i' = 15$, потужності двигуна $P = 8$ кВт та номінальному обертовому моменту двигуна $M = 59.22$ Н · м обирається з довідника редуктор.

Редуктор обраний фірми BONFIGLIOLI, модель – VF130_15. Параметри редуктора:

1) Обертальний момент на тихоходному валу: $min = 750$ Н · м;
 $max = 1080$ Н · м;

2) Передавальна потужність: $min = 5.5$ кВт; $max = 10$ кВт;

3) Допустиме радіальне консольне навантаження прикладене до середини посадочної частини тихоходного валу $min = 1000 \text{ Н}$; $max = 1580 \text{ Н}$;

4) Допустиме радіальне консольне навантаження прикладене до середини посадочної частини швидкоходного валу $min = 8000 \text{ Н}$; $max = 14500 \text{ Н}$;

5) Номінальне передаточне число $i = 15$;

6) ККД не менше 88%;

7) Міжвісна відстань 150 мм;

8) Частота обертання швидкохідного валу не більше $1700 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

5.4 Розрахунок і моделювання системи підлеглого керування електроприводом постійного струму з тиристорним перетворювачем.

5.4.1 Розрахунок основних параметрів двигуна

Силовими вузлами системи автоматичного керування є: двигун, тиристорний перетворювач, найчастіше комплектний, до складу якого включається силовий трансформатор або дросель, елементи датчика струму та інші деталі.

Двигун в системі обраний за вище вказаними розрахунками – це модель П–52 з параметрами:

1) Номінальна потужність: $P_{\text{н}} = 8 \text{ кВт}$;

2) Номінальний струм: $I_{\text{н}} = 86 \text{ А}$;

3) Номінальна напруга: $U_{\text{н}} = 110 \text{ В}$;

4) Номінальна частота обертання $n = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$;

5) ККД: $\eta = 0.86$;

6) $R_{\text{яд}15^\circ} + R_{\text{дп}15^\circ} = 0.00656 \text{ Ом}$;

7) $J_{\text{дв}} = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

8) $p = 2$.

Виходячи з параметрів двигуна, обирається з довідника трансформатор типу ТСП-16/0,7-В з параметрами:

- 1) Номінальна потужність: $S = 18$ кВт;
- 2) Номінальна напруга: $U_1 = 380$ В;
- 3) Випрямлена номінальна напруга: $U_2 = 24$ В;
- 4) Напруга короткого замикання: $U_{кз} = 4.5\%$.

В якості датчика швидкості обирається тахогенератор типу ТМГ-30 з параметрами:

- 1) Номінальна напруга $U_{н\text{ тг}} = 230$ В;
- 2) Номінальна частота обертання: $n_{н\text{ тг}} = 4000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

Радіанна міра швидкості обертання двигуна:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} \approx 157.01 \text{ [с}^{-1}\text{]};$$

Опір якірного ланцюга двигуна, приведенного до робочої температури 75 °С:

$$R_{яд} = \beta \cdot (R_{я} + R_{дп}) = 1.24 \cdot 0.00656 \approx 0.008 \text{ [Ом]};$$

де $\beta = 1.24$ – коефіцієнт, що враховує зміну опору обмоток при нагріві на 60°С.

Коефіцієнт ЕРС:

$$k\Phi = \frac{U_n - I_n \cdot R_{яд}}{\omega_n} = \frac{110 - 86 \cdot 0.008}{157.01} \approx 0.696 \text{ [В} \cdot \text{с]};$$

Передаючий коефіцієнт двигуна:

$$k_d = \frac{1}{kF} = \frac{1}{0.696} \approx 1.44 \left[\frac{1}{\text{В} \cdot \text{с}} \right];$$

Індуктивність якоря двигуна:

$$L_{яд} = C \cdot \frac{U_n}{I_n \cdot n_n \cdot p} = 1 \cdot \frac{110}{86 \cdot 1500 \cdot 2} \approx 4.26 \cdot 10^{-4} \text{ [Гн]};$$

де $C = 1 \dots 2.5$

Активний опір та індуктивність двох фаз трансформатора:

$$R_T = 0.2 \cdot \frac{U_{к\%}}{100\%} \cdot \frac{\pi}{m} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{дн}} = 0.2 \cdot \frac{4.5}{100} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \frac{276.75}{1000} \approx 0.0013 \text{ [Ом]};$$

$$L_T = \frac{U_K \%}{100 \%} \cdot \frac{1}{2mf_c} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{дн}} = \frac{4.5}{100} \cdot \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} \cdot \frac{276.75}{1000} \approx 2.08 \cdot 10^{-5} [\text{Гн}];$$

де $E_{d0} = 276.75$ – максимальна ЕРС перетворювача;

$I_{дн} = 1000$ А – номінальний випрямлений струм;

$f_c = 50$ Гц – частота мережі. Динамічний опір тиристора:

$$R_{\text{тир}} = 0.25 \cdot \frac{U_{\text{тир}}}{I_{\text{тир}}} = 0.25 \cdot \frac{2.1}{1000} = 5.25 \cdot 10^{-4} [\text{Ом}];$$

де $U_{\text{тир}} = 2.1$ В – пряме падіння напруги на тиристорі при номінальному струмі;

$I_{\text{тир}} = 1000$ А – номінальний струм тиристора.

Комутаційний опір перетворювача:

$$R_K = \frac{x_n \cdot m}{2\pi} = \frac{0.0065 \cdot 6}{2 \cdot \pi} \approx 0.0062 [\text{Ом}];$$

де

$$x_n = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot L_T = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2.08 \cdot 10^{-4} \approx 0.0065 [\text{Ом}];$$

Опір шунта:

$$R_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш}}}{I_{\text{ш}}} = \frac{0.075}{215} \approx 3.5 \cdot 10^{-4} [\text{Ом}];$$

де напруга шунта і струм шунта дорівнюють:

$$U_{\text{ш}} = 0.075 \text{ В};$$

$$I_{\text{ш}} = 2.5 \cdot I_H = 2.5 \cdot 86 = 215 [\text{А}];$$

Еквівалентний опір ланцюга якоря:

$$\begin{aligned} R_{\text{я}} &= R_{\text{яд}} + R_T + 2R_{\text{тир}} + R_K + R_{\text{ш}} = \\ &= 0.008 + 0.0013 + 2 \cdot 5.25 \cdot 10^{-4} + 0.0062 + 3.5 \cdot 10^{-4} \approx 0.017 [\text{Ом}]; \end{aligned}$$

Граничний кут регулювання:

$$\alpha_{\text{max}} = \arccos \left(\frac{k\Phi \cdot \omega_{\text{min}} + I_H R_{\text{я}}}{E_{d0}} \right) = \arccos \left(\frac{0.696 \cdot 7.854 + 86 \cdot 0.017}{276.75} \right) = 88.6^\circ;$$

де

$$\omega_{\text{min}} = \frac{\omega_H}{D} = \frac{157.01}{20} = 7.854 [\text{с}^{-1}];$$

Величина індуктивності якірного ланцюга, що необхідна для забезпечення режиму постійного струму:

$$L_{\text{необх}} = \frac{0.46 \cdot U_2 \cdot \sin \alpha_{\max}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot m \cdot I_{d \text{ гр}}} = \frac{0.46 \cdot 24 \cdot \sin 88.6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 6 \cdot 100} \approx 3.31 \cdot 10^{-5} [\text{Гн}];$$

де граничний струм, що розділяє зони постійного та змінного струму дорівнює:

$$I_{d \text{ гр}} = 0.1 \cdot I_{d \text{ н}} = 0.1 \cdot 1000 = 100 [\text{А}];$$

Індуктивність згладжуючого дроселя:

$$\begin{aligned} L_{\text{сд}} &= L_{\text{необх}} - L_{\text{яд}} - L_{\text{Т}} = \\ &= 3.31 \cdot 10^{-5} - 4.26 \cdot 10^{-4} - 2.08 \cdot 10^{-5} \approx -4.14 \cdot 10^{-4} [\text{Гн}]; \end{aligned}$$

Результат розрахунку зі знаком "мінус", що свідчить про достатню індуктивність якірного ланцюга без застосування додаткового згладжуючого дроселя.

Для даної роботи обирається згладжуючий дросель типу ФРОС-250/0.5 (250 – потужність, *кВА*; 0.5 – клас напруги, *кВ*; Ф – фільтровий; Р – реактор; О – однофазний; С – природне повітряне охолодження при відкритому виконанні) з індуктивністю 0.35 мГн.

Постійна часу якірного ланцюга:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{яд}} + L_{\text{Т}} + L_{\text{сд}}}{R_{\text{я}}} = \frac{4.26 \cdot 10^{-4} + 2.08 \cdot 10^{-5} - 4.14 \cdot 10^{-4}}{0.017} \approx 0.0019 [\text{с}];$$

Електромеханічна постійна часу, при умові, що момент інерції механізму $J_{\text{мех}}$ рівний моменту інерції двигуна $J_{\text{дв}}$:

$$T_{\text{м}} = \frac{2 \cdot J_{\text{дв}} \cdot R_{\text{я}}}{(k\Phi)^2} = \frac{2 \cdot 0.1 \cdot 0.017}{0.696^2} = 0.007 [\text{с}];$$

Розрахунок коефіцієнту зворотного зв'язку по струму та швидкості. Канал зворотного зв'язку за струмом, містить вимірюваний шунт з коефіцієнтом $k_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}$ та стандартну комірку датчика струму, що має коефіцієнт:

$$k_{\text{ядт}} = \frac{U_{\text{дт max}}}{U_{\text{ш}}} = \frac{10}{0.075} \approx 133.33;$$

Загальний коефіцієнт каналу зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{дт} = k_{ш} \cdot k_{ядт} = 3.5 \cdot 10^{-4} \cdot 133.33 \approx 0.047 \left[\frac{\text{В}}{\text{А}} \right];$$

В каналі зворотного зв'язку за швидкістю використаний тахогенератор, передаточний коефіцієнт якого рівний:

$$k_{тг} = \frac{U_{н тг}}{\pi \cdot n_{н тг}} = \frac{230}{\pi \cdot 4000} \approx 0.55 [\text{В} \cdot \text{с}];$$

Зворотній зв'язок за швидкістю повинен забезпечувати напругу зворотного зв'язку 10 В при максимально можливій швидкості двигуна:

$$k_{дс} = \frac{U_{дс max}}{\omega_0} = \frac{U_{дс max}}{U_{н} \cdot k_{д}} = \frac{10}{110 \cdot 1.44} \approx 0.06 [\text{В} \cdot \text{с}];$$

Відповідно, після тахогенератора необхідно встановити дільник напруги з коефіцієнтом ділення:

$$k_{дел} = \frac{k_{дс}}{k_{тг}} = \frac{0.06}{0.55} = 0.12;$$

Тиристорний перетворювач представляє собою аперіодичну ланку першого порядку. Постійна часу $T_{п}$, як правило, приймається рівною 0.01 с. Так як в електроприводі характеристика перетворювача $E_d = f(u_y)$ лінійна, то коефіцієнт передачі перетворювача визначається як:

$$k_{п} = \frac{E_{d0}}{U_{дс max}} = \frac{276.75}{10} \approx 27.68;$$

5.4.2 Оптимізація контуру струму якоря.

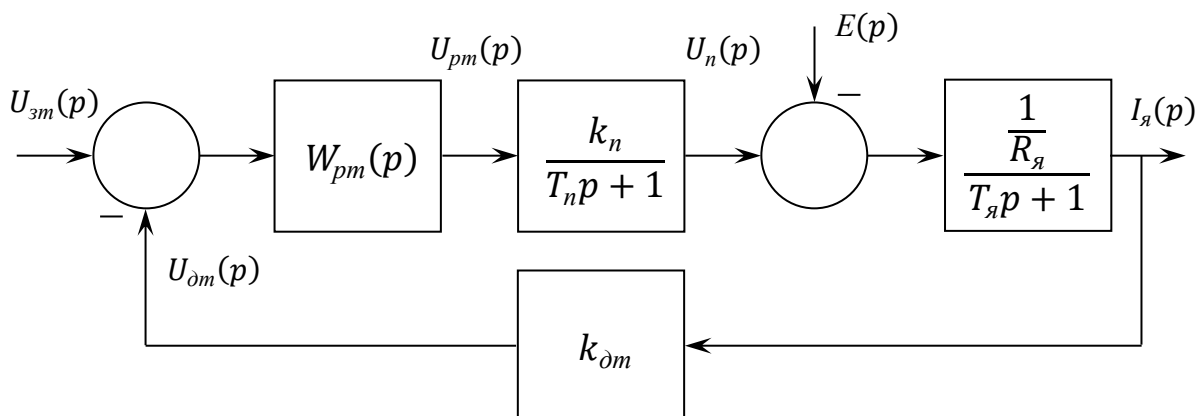


Рис.5.4 Структурна схема контуру струму якоря в системі тиристорного перетворювача.

$U_{зт}(p)$ – задаюча напруга на вході контуру струму;

$U_{дт}(p)$ – напруга зворотного зв'язку за струмом;

$U_{рт}(p)$ – напруга на виході регулятора струму;

$W_{тр}(p)$ – передаточна функція регулятора струму;

$k_{дт}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом.

Передаточна функція регулятора:

$$W_{рт}(p) = \frac{(T_я p + 1)R_я}{2 \cdot T_п \cdot k_п \cdot k_{дт}} = \frac{(0.009p + 1) \cdot 0.017}{2 \cdot 0.01 \cdot 27.68 \cdot 0.047} = 0.001285p + 0.6628;$$

Постійна часу інтегрування регулятора:

$$T_{и} = R_{зт}C_{ост} = \frac{2 \cdot T_п \cdot k_п \cdot k_{дт}}{R_я} = \frac{2 \cdot 0.01 \cdot 27.68 \cdot 0.047}{0.017} \approx 1.51 [с];$$

Постійна часу зворотного зв'язку:

$$T_{ос} = T_я = R_{ост} \cdot C_{ост};$$

Для даної системи постійна часу інтегрування (знаменник передаточної функції) $T_{и} = 0.1$ с, постійна часу зворотного зв'язку $T_{ос} = T_я = 0.009$ с. Тоді, задаючись ємністю конденсатора $C_{ост}$ в діапазоні значень від 0.1 до 2 мкФ, визначається опір резистору:

$$R_{ост} = \frac{T_я}{C_{ост}} = \frac{0.0019}{10^{-6}} = 1.9 \cdot 10^3 [Ом];$$

Розрахунок коефіцієнту зворотного зв'язку по струму та швидкості. Канал зворотного зв'язку за струмом, містить вимірюваний шунт з коефіцієнтом $k_{ш} = R_{ш}$ та стандартну комірку датчика струму, що має коефіцієнт:

$$k_{ядт} = \frac{U_{дт max}}{U_{ш}} = \frac{10}{0.075} \approx 133.33;$$

Загальний коефіцієнт каналу зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{дт} = k_{ш} \cdot k_{ядт} = 3.5 \cdot 10^{-4} \cdot 133.33 \approx 0.047 \left[\frac{В}{А} \right];$$

В каналі зворотного зв'язку за швидкістю використаний тахогенератор, передаточний коефіцієнт якого рівний:

$$k_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{н тг}}}{\pi \cdot n_{\text{н тг}}} = \frac{230}{\pi \cdot 4000} \approx 0.55 [\text{В} \cdot \text{с}];$$

Зворотній зв'язок за швидкістю повинен забезпечувати напругу зворотного зв'язку 10 В при максимально можливій швидкості двигуна:

$$k_{\text{дс}} = \frac{U_{\text{дс max}}}{\omega_0} = \frac{U_{\text{дс max}}}{U_{\text{н}} \cdot k_{\text{д}}} = \frac{10}{110 \cdot 1.44} \approx 0.06 [\text{В} \cdot \text{с}];$$

Відповідно, після тахогенератора необхідно встановити дільник напруги з коефіцієнтом ділення:

$$k_{\text{дел}} = \frac{k_{\text{дс}}}{k_{\text{тг}}} = \frac{0.06}{0.55} = 0.12;$$

Тиристорний перетворювач представляє собою аперіодичну ланку першого порядку. Постійна часу $T_{\text{п}}$, як правило, приймається рівною 0.01 с. Так як в електроприводі характеристика перетворювача $E_d = f(u_y)$ лінійна, то коефіцієнт передачі перетворювача визначається як:

$$k_{\text{п}} = \frac{E_{d0}}{U_{\text{дс max}}} = \frac{276.75}{10} \approx 27.68;$$

Передаточна функція регулятора:

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{(T_{\text{я}}p + 1)R_{\text{я}}}{2T_{\text{п}}k_{\text{п}}k_{\text{дт}}} = \frac{(0.009p + 1) \cdot 0.017}{2 \cdot 0.01 \cdot 27.68 \cdot 0.047} = 0.001285p + 0.6628;$$

Постійна часу інтегрування регулятора:

$$T_{\text{и}} = R_{\text{зт}}C_{\text{ост}} = \frac{2 \cdot T_{\text{п}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{дт}}}{R_{\text{я}}} = \frac{2 \cdot 0.01 \cdot 27.68 \cdot 0.047}{0.017} \approx 1.51 [\text{с}];$$

Постійна часу зворотного зв'язку:

$$T_{\text{ос}} = T_{\text{я}} = R_{\text{ост}}C_{\text{ост}};$$

Для даної системи постійна часу інтегрування (знаменник передаточної функції) $T_{\text{и}} = 0.1$ с, постійна часу зворотного зв'язку $T_{\text{ос}} = T_{\text{я}} = 0.009$ с. Тоді, задаючись ємністю конденсатора $C_{\text{ост}}$ в діапазоні значень від 0.1 до 2 мкФ, визначається опір резистору:

$$R_{\text{ост}} = \frac{T_{\text{я}}}{C_{\text{ост}}} = \frac{0.0019}{10^{-6}} = 1.9 \cdot 10^3 [\Omega];$$

$$R_T = R_{зт} = \frac{T_{и}}{C_{ост}} = \frac{0.1}{10^{-6}} = 100000 \text{ [Ом]};$$

Передаточна функція замкнутого оптимізованого контуру струму:

$$W_T = \frac{I_{я}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{k_T}{2T_{п}^2 p^2 + 2T_{п}p + 1} = \frac{21.5}{2 \cdot 0.01^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0.01 \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{21.5}{2 \cdot 10^{-4} p^2 + 0.02p + 1};$$

де коефіцієнт передачі оптимізованого контуру дорівнює:

$$k_T = \frac{1}{k_{дт}} = \frac{1}{0.047} = 21.5;$$

5.4.3 Оптимізація контуру швидкості.

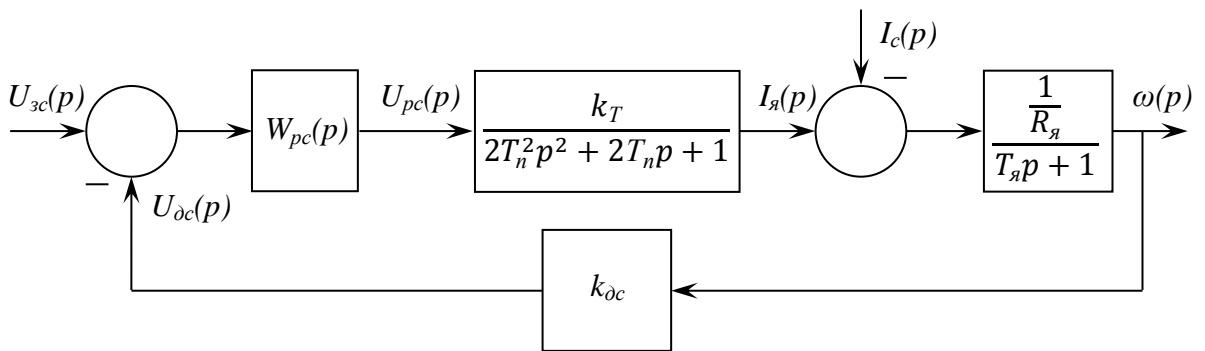


Рис. 5.5 Структурна схема замкнутого контуру регулювання швидкості.

$U_{зс}(p)$ – напруга задання швидкості;

$U_{дс}(p)$ – напруга зворотного зв'язку по швидкості;

$W_{рс}(p)$ – передаточна функція регулятора швидкості;

$k_{дс}$ – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку по швидкості.

Перш за все, потрібно визначити вид регулятора швидкості – пропорційний або інтегрально-пропорційний. Застосування того чи іншого типу регулятора визначається вимогами до статичної помилку при відпрацюванні моменту навантаження.

У першому випадку отримана система електропривода буде мати статичну похибку за швидкістю, у другому випадку – астатичні властивості.

Статистична похибка за швидкістю:

$$\Delta\omega_3 = I_H \cdot k_d \cdot R_{я} \cdot \frac{4T_{\Pi}}{T_M} = 86 \cdot 1.44 \cdot 0.02 \cdot \frac{4 \cdot 0.01}{0.007} \approx 11.97 [\text{с}^{-1}];$$

або в процентах від ω_0 :

$$\delta = \frac{\Delta\omega_3}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta\omega_3}{\frac{U_H}{k\Phi}} \cdot 100\% = \frac{11.97}{\frac{110}{0.696}} \approx 7.57\%$$

Застосовується пропорційний регулятор швидкості та оптимізація за модульним оптимум.

Передаточна функція регулятора:

$$W_{pc}(p) = k_{pc} = \frac{T_M}{k_d R_{я} k_{дс} k_T 4T_{\Pi}} = \frac{0.007}{1.44 \cdot 0.02 \cdot 0.06 \cdot 21.5 \cdot 4 \cdot 0.01} \approx 5.28;$$

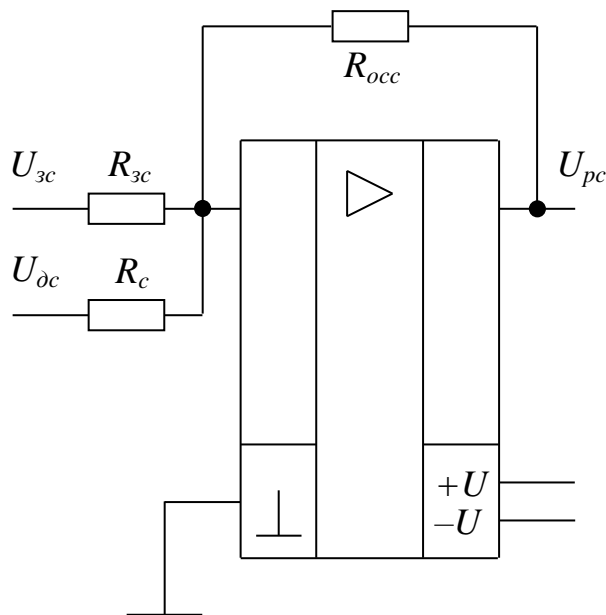


Рис. 5.6 Схема П-регулятора швидкості.

Передаточні функції замкнутого оптимізованого контуру швидкості за керуючим впливом:

$$W_c(p) = \frac{\omega(p)}{U_{3c}} = \frac{k_c}{8T_{\Pi}^3 p^3 + 8T_{\Pi}^2 p^2 + 4T_{\Pi} p + 1} =$$

$$= \frac{15.7}{8 \cdot 0.01^3 \cdot p + 8 \cdot 0.01^2 \cdot p + 0.01 \cdot p + 1} = \frac{1.96 \cdot 10^6}{p^3 + 100p^2 + 5000p + 1.25 \cdot 10^5};$$

де

$$k_c = \frac{\omega_H}{10} = \frac{157.01}{10} \approx 15.7;$$

Передаточна функція інтегрально-пропорційного регулятора швидкості:

$$W_{pc}(p) = \frac{8T_{\Pi}p + 1}{8T_{\Pi}p} \cdot k_{pc} = \frac{8 \cdot 0.01 \cdot p + 1}{8 \cdot 0.01 \cdot p} \cdot 60.5 = \frac{4.84p + 60.5}{0.08};$$

де коефіцієнт пропорційного регулятора швидкості $k_{pc} = 60.5$.

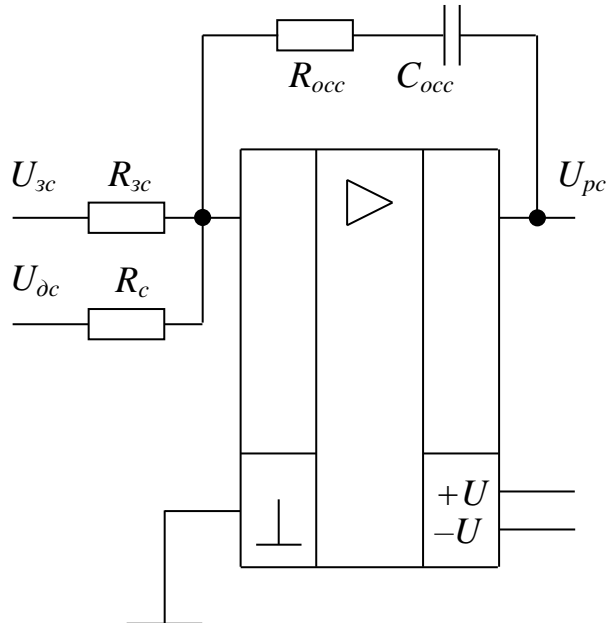


Рис.5.7 Схема ІІ-регулятора швидкості.

Задаючись величиною ємності $C_{occ} = 4.7$ мкФ визначаються опори резисторів в схемі пропорційного регулятора швидкості:

$$R_c = R_{zc} = \frac{8 \cdot T_{\Pi}}{C_{occ}} = \frac{8 \cdot 0.01}{4.7 \cdot 10^{-6}} \approx 17 \cdot 10^3 [\text{Ом}];$$

$$R_{occ} = R_c \cdot k_{pc} = 17 \cdot 10^3 \cdot 60.5 \approx 10^6 [\text{Ом}];$$

Передаточна функція замкнутого контуру швидкості:

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{\omega(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{k_c(8T_{\Pi}p + 1)}{64T_{\Pi}^4p^4 + 64T_{\Pi}^3p^3 + 32T_{\Pi}^2p^2 + 8T_{\Pi}p + 1} = \\ &= \frac{15.7 \cdot (8 \cdot 0.01 + 1)}{64 \cdot 0.01^4 \cdot p^4 + 64 \cdot 0.01^3 \cdot p^3 + 32 \cdot 0.01^2 p^2 + 8 \cdot 0.01 p + 1} = \\ &= \frac{2.65 \cdot 10^7}{p^4 + 100p^3 + 5000p^2 + 1.25 \cdot 10^5 p + 1.56 \cdot 10^6}; \end{aligned}$$

Для усунення впливу формуючої складової $(8T_{\Pi}p + 1)$, яка може призвести до значного пере регулювання за швидкістю, в чисельнику передаточної функції потрібний фільтр на вході системи з постійною часу $T_{\Phi} = 8T_{\Pi} = 0.08\text{с}$.

Ємність фільтру:

$$C_{\phi} = \frac{T_{\phi}}{0.5 \cdot R_{3c}} = \frac{0.08}{0.5 \cdot 17 \cdot 10^3} = 9.4 \cdot 10^{-6} [\Phi];$$

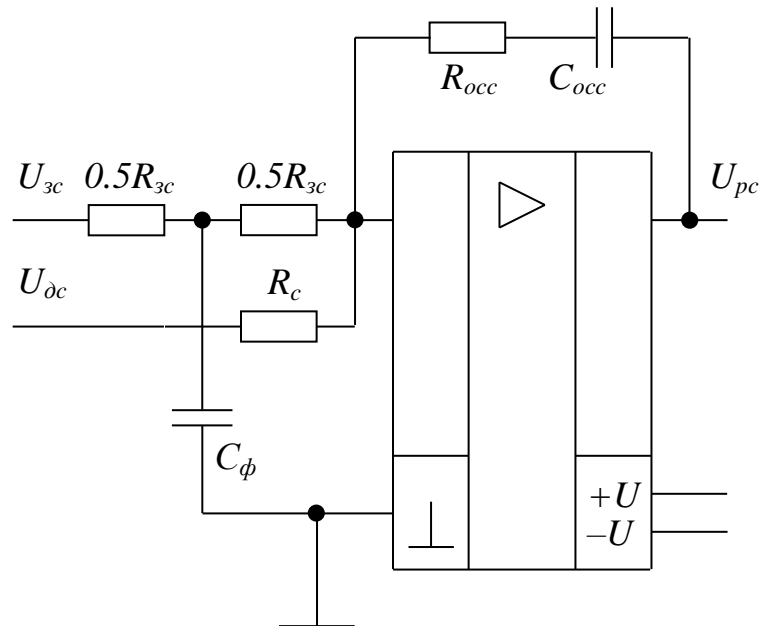


Рис. 5.8 Схема ІІ-регулятора швидкості з фільтром на вході.

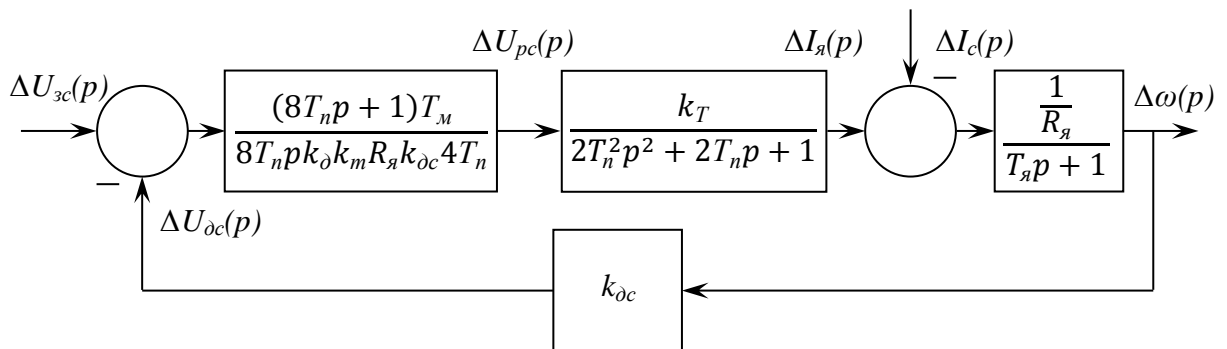


Рис. 5.9 Структурна схема системи з ІІ-регулятором швидкості.

Статизм на природній характеристиці електродвигуна:

$$\Delta\omega_{дв} = \frac{I_{я} \cdot R_{яд}}{k\Phi} = \frac{86 \cdot 0.008}{0.696} \approx 0.99 [c^{-1}];$$

Статизм в розімкнутій системі електродвигуна:

$$\Delta\omega_p = \frac{I_{я} \cdot R_{я}}{k\Phi} = \frac{86 \cdot 0.017}{0.696} \approx 2.11 [c^{-1}];$$

Побудова статистичних характеристик системи (рис.5.10):

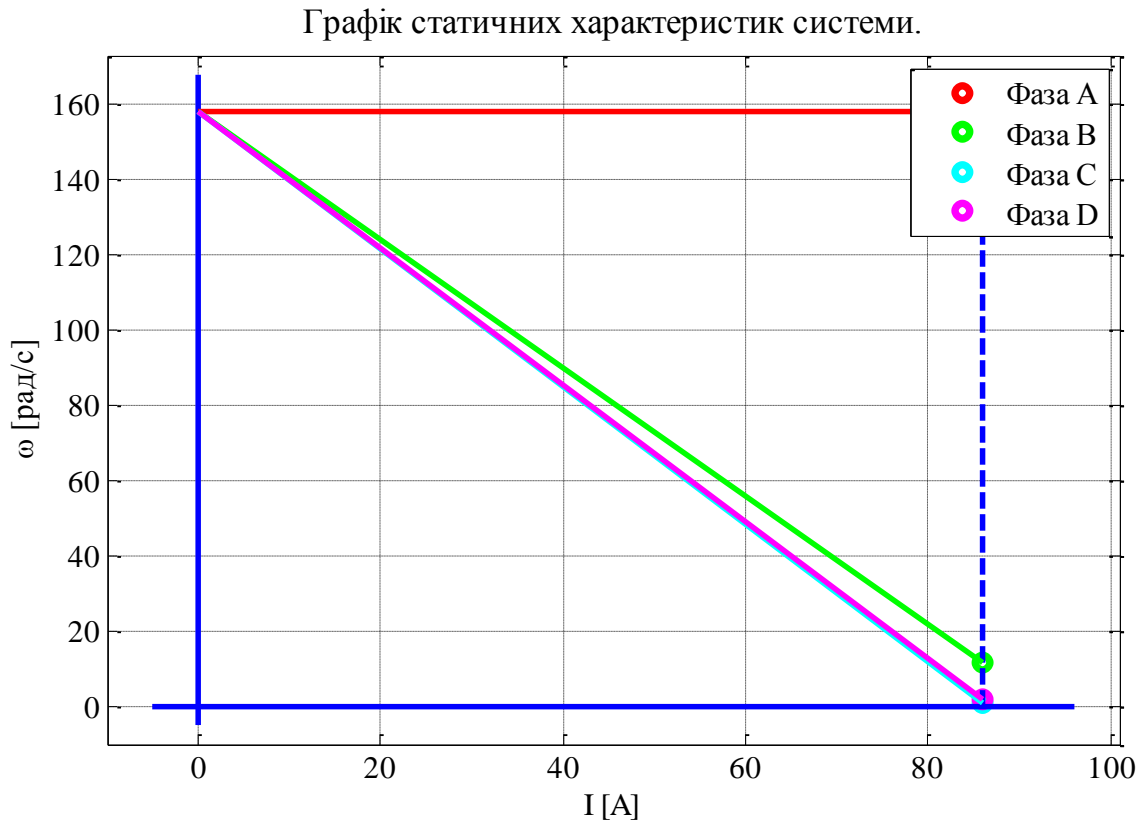


Рис. 5.10. Графік статистичних характеристик системи.

Необхідний вид залежності $\omega(t)$ та $I_{\text{я}}(t)$ в одноразово-інтегруючій системі можна забезпечити за рахунок використання блоку обмеження вихідної напруги регулятора швидкості при пуску.

Розрахунок значення $U_{\text{огр}}$ для заданого значення пускового струму $I_{\text{п}}$:

$$I_{\text{п}} = 2.5 \cdot I_{\text{н}} = 2.5 \cdot 86 = 215 \text{ [A]};$$

$$U_{\text{огр}} = k_{\text{дт}} \cdot I_{\text{п}} = 0.045 \cdot 215 = 10 \text{ [В]};$$

У дворазово-інтегруючій системі застосування блоку обмеження для формування пускових характеристик неможливо в силу значного зростання перерегулювання і коливання на зрізі кривої струму. Для формування оптимальних пускових характеристик використовується за датчик інтенсивності.

Знаючи пусковий струм $I_{\text{п}} = I_{\text{я уст}} = 215 \text{ А}$, розраховується постійна часу інтегрування за датчика інтенсивності:

$$T = \frac{U_{\text{зс}} \cdot k_{\text{с}} \cdot T_{\text{м}}}{I_{\text{я уст}} \cdot k_{\text{д}} \cdot R_{\text{я}}} = \frac{10 \cdot 15.7 \cdot 0.007}{215 \cdot 1.44 \cdot 0.017} \approx 0.21 \text{ [с]};$$

Опір часозадаючого RC-ланцюга задатчика інтенсивності розраховується задавшись $C_{зи} = 5.1$ мкФ:

$$R_{зи} = \frac{T}{C_{зи}} = \frac{0.21}{5.1 \cdot 10^{-6}} \approx 41155 \text{ [Ом]};$$

Для можливості оперативного підстроювання, використовується змінний резистор типу СПЗ-38 з номінальним опором 510 Ом.

5.4.4 Моделювання системи керування з використанням Simulink.

Моделювання системи керування електродвигуна в MATLAB з використанням Simulink.

Даний метод моделювання здійснюється на основі вихідної структурної схеми САК та являється найбільш наочним.

Таблица 1. Кодування параметрів.

В схемах	кФ	кд	кт	кдт	кдс	кп	крс	Ря	Тя	Тм	Тп	Т	Р
В программе	KF	Kd	Kt	Kdt	Kdc	Kp	Kpc	Ra	Ta	Tm	Tp	Tzi	s

Модель двоконтурної системи автоматичного керування з П-регулятором швидкості та блоком обмеження (рис. 5.11):

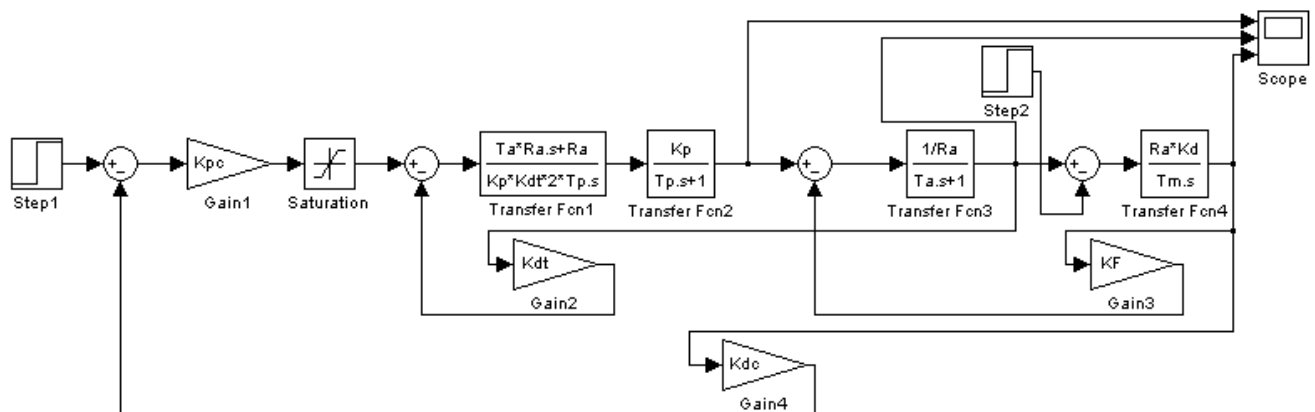


Рис.5.11 Модель двоконтурної САК з П-регулятором швидкості та блоком обмеження.

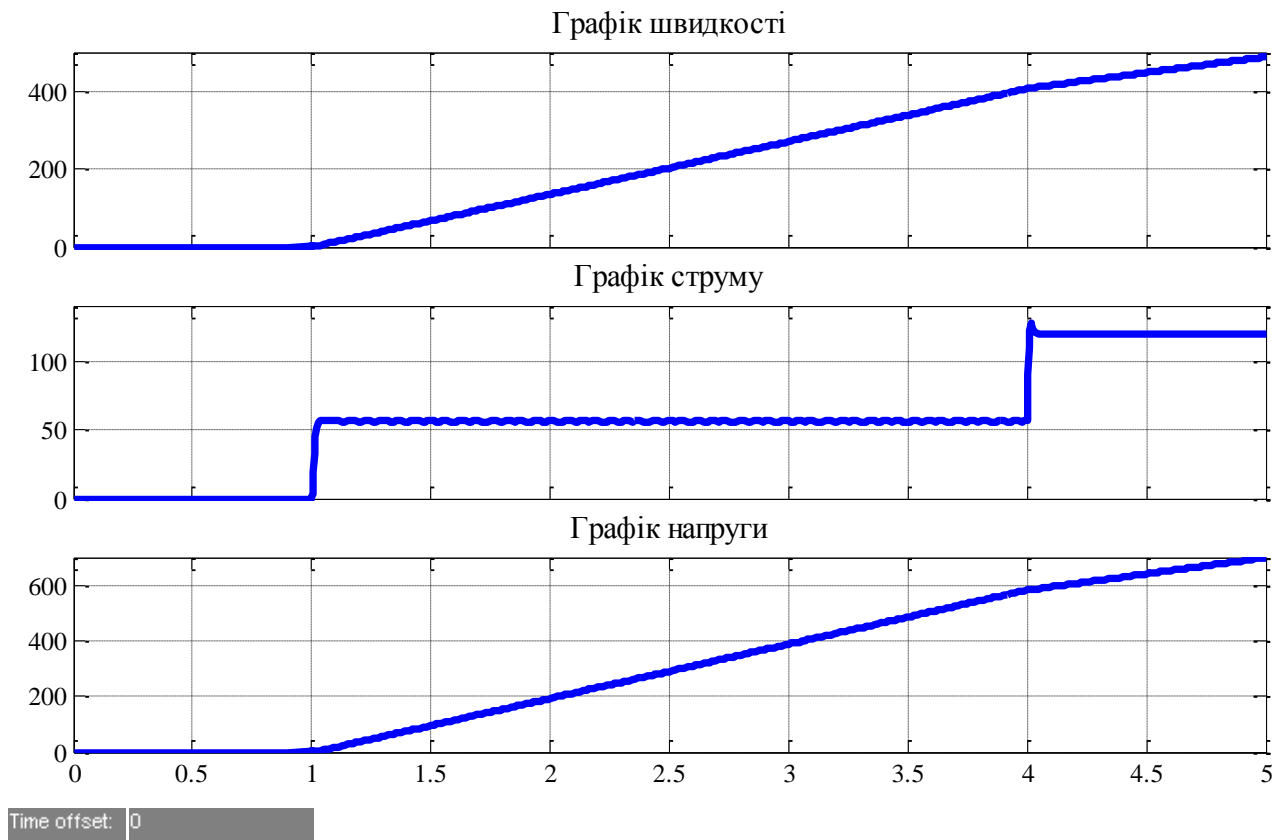


Рис. 5.12 Графіки перехідних процесів зняті з осцилографа моделі.

Модель двоконтурної системи автоматичного керування з П-регулятором швидкості та задатчиком інтенсивності на вході (рис.5.13).

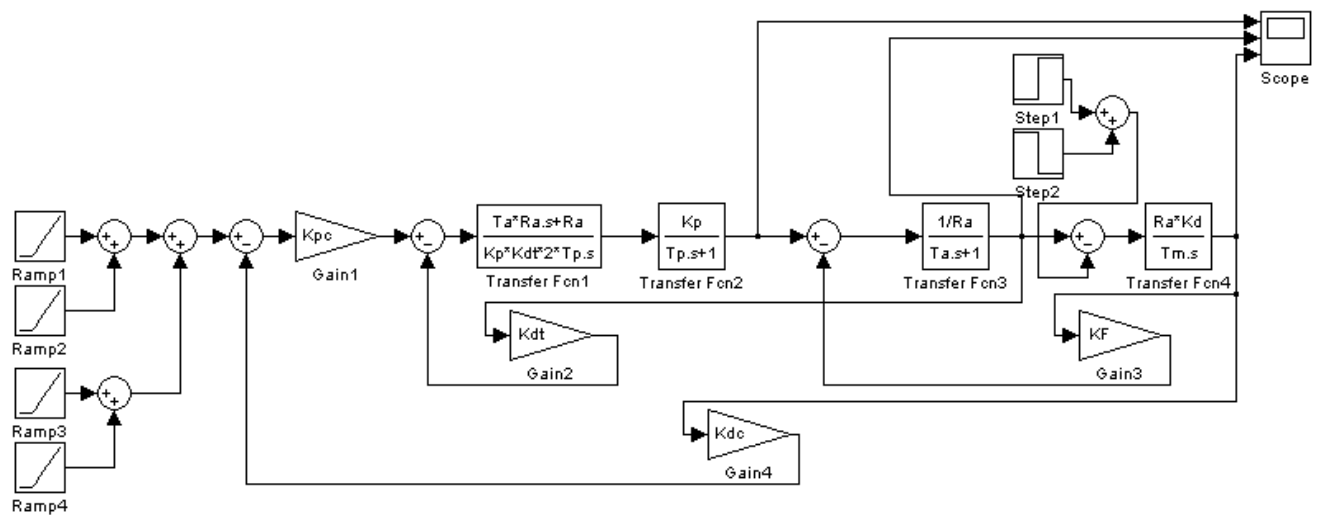


Рис. 5.13 Модель двоконтурної САК з П-регулятором швидкості та задатчиком інтенсивності на вході.

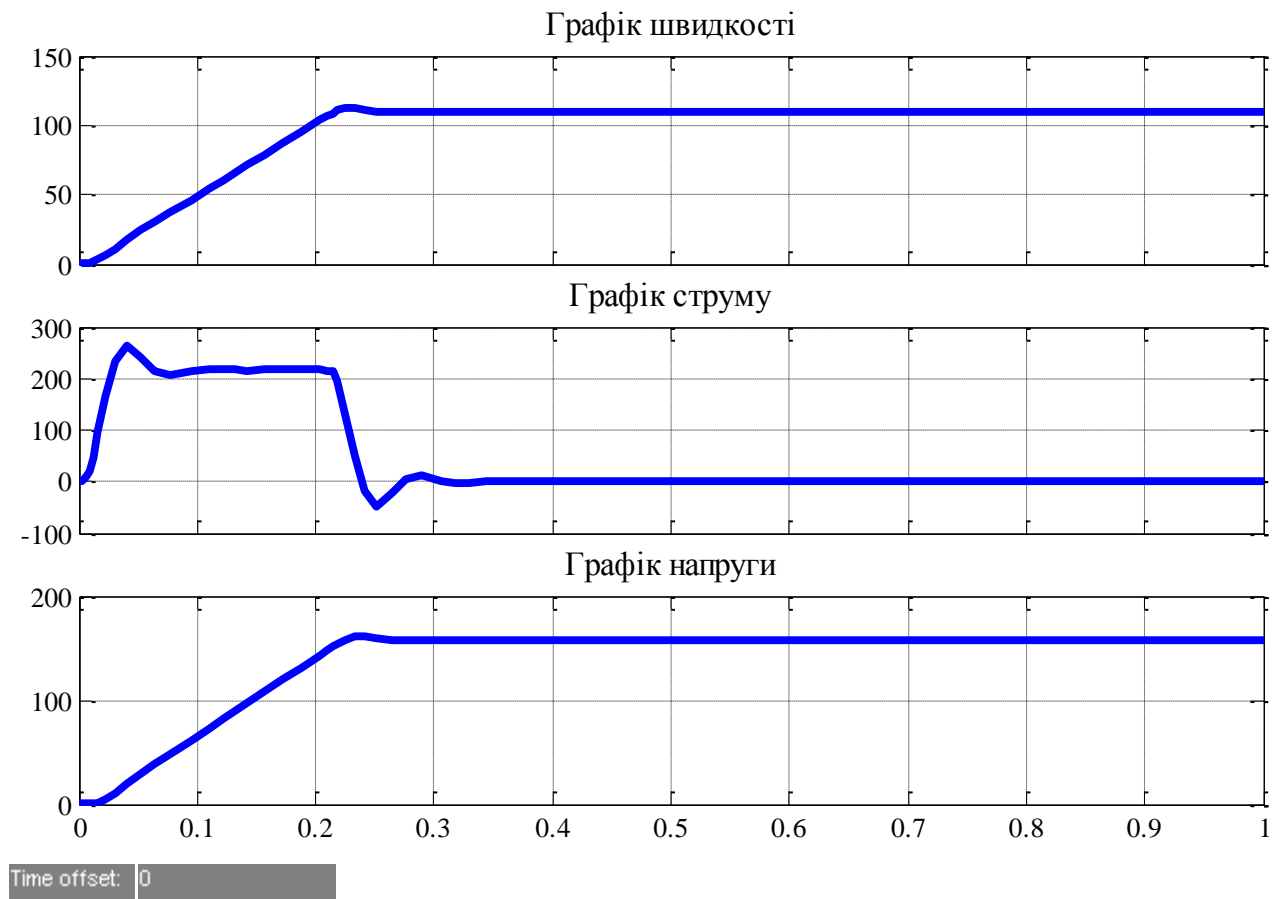


Рис.5.14 Графіки перехідних процесів зняті з осцилографа моделі.

Модель двоконтурної системи автоматичного керування з ПІ-регулятором швидкості та задатчиком інтенсивності на вході (рис. 5.15).

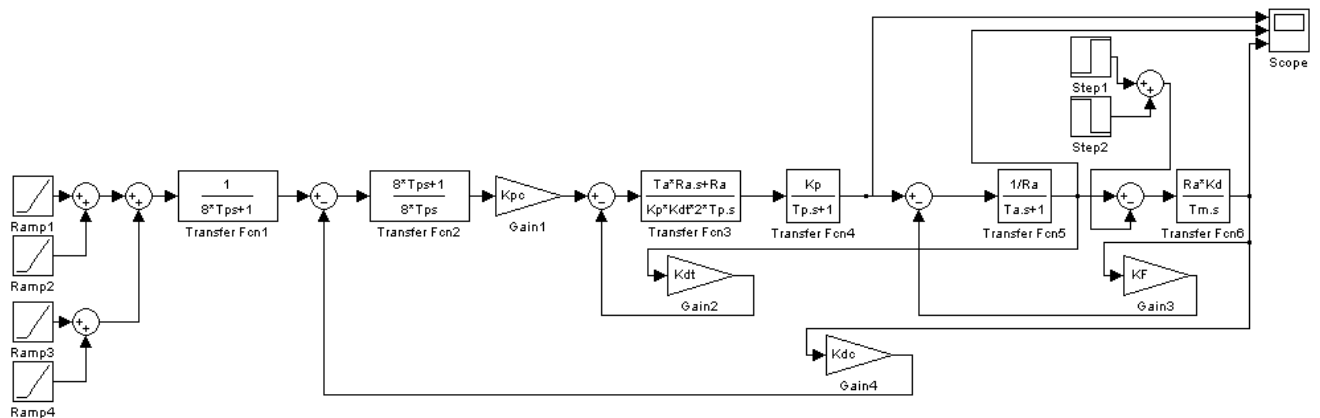


Рис. 5.15 Модель двоконтурної САК з ПІ-регулятором швидкості та задатчиком інтенсивності на вході.

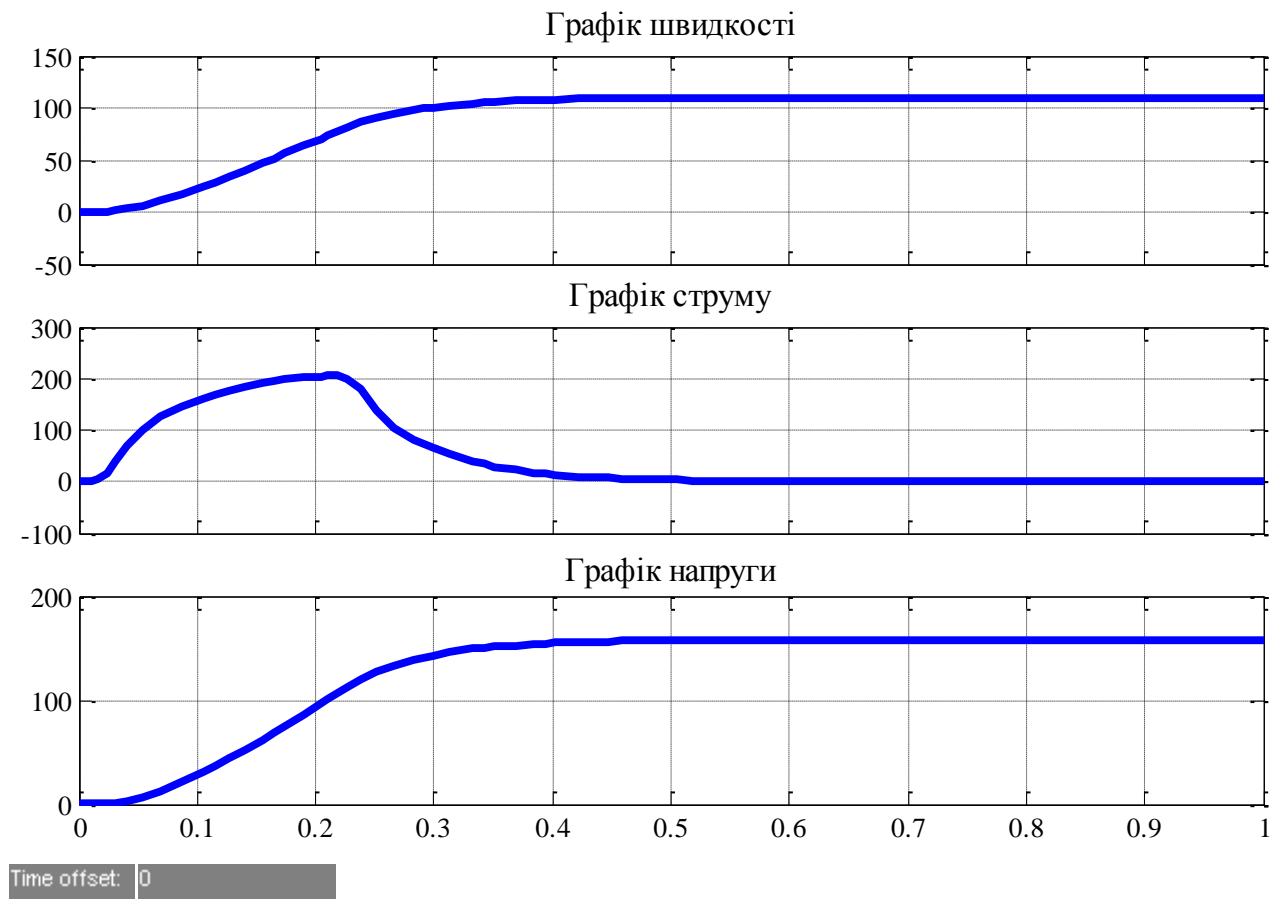


Рис.5.16 Графіки перехідних процесів зняті з осцилографа моделі.

Модель задатчика інтенсивності, наближена до схемної реалізації в реальних електродвигунах (рис. 5.17).

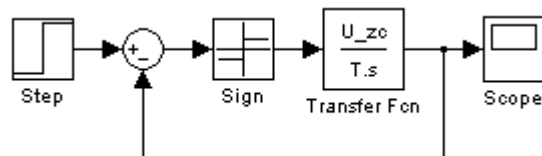


Рис. 5.17. Модель задатчика інтенсивності, наближена до схемної реалізації в реальних електродвигунах.

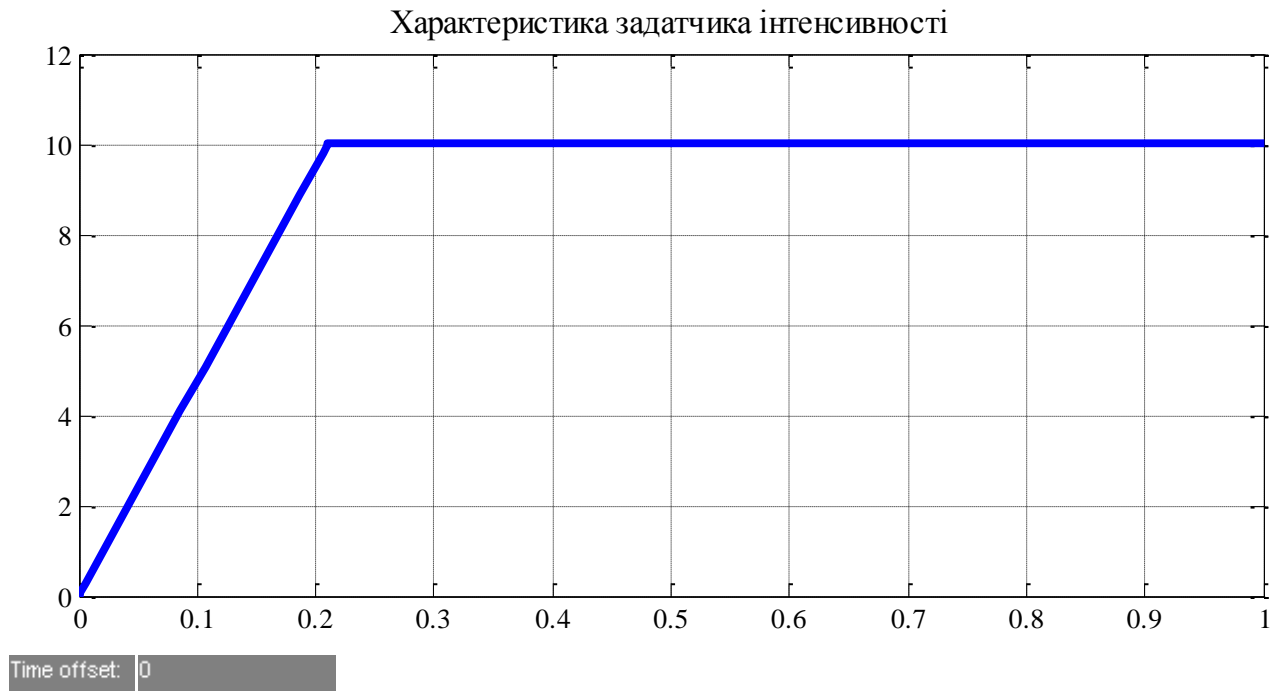


Рис.5.18 Графік перехідного процесу знятий з осцилографа моделі.

5.4.5 Аналіз та моделювання системи керування з використанням пакету Control System Toolbox.

Виходячи з можливостей пакета Control System Toolbox, ставиться задача знаходження тимчасових відгуків на сигнал від за датчика інтенсивності в ідеалізованій двоконтурній системі підлеглого регулювання з П-регулятором швидкості.

Передаточна функція всієї САК, що зв'язує кутову швидкість двигуна з напругою задатчика інтенсивності:

$$W_c(p) = \frac{\omega(p)}{U_{zc}} = \frac{k_c}{8T_{\Pi}^3 p^3 + 8T_{\Pi}^2 p^2 + 4T_{\Pi} p + 1} =$$

$$= \frac{15.7}{8 \cdot 0.01^3 \cdot p + 8 \cdot 0.01^2 \cdot p + 0.01 \cdot p + 1} = \frac{1.96 \cdot 10^6}{p^3 + 100p^2 + 5000p + 1.25 \cdot 10^5};$$

Передаточна функція частини САК, що зв'язує струм якоря двигуна з напругою задатчика інтенсивності:

$$W_T(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_{zc}(p)} = \frac{k_c T_M p}{(8T_{\Pi}^3 p^3 + 8T_{\Pi}^2 p^2 + 4T_{\Pi} p + 1) R_{\text{я}} k_d} =$$

$$= \frac{15.7 \cdot 0.007 \cdot p}{(8 \cdot 0.01^3 \cdot p + 8 \cdot 0.01^2 \cdot p + 0.01 \cdot p + 1) \cdot 0.017 \cdot 1.44} =$$

$$= \frac{4.513p}{8 \cdot 10^6 p^3 + 0.0008p^2 + 0.04p + 1};$$

Побудова графіків перехідних процесів: рис. 5.19, рис. 5.20.

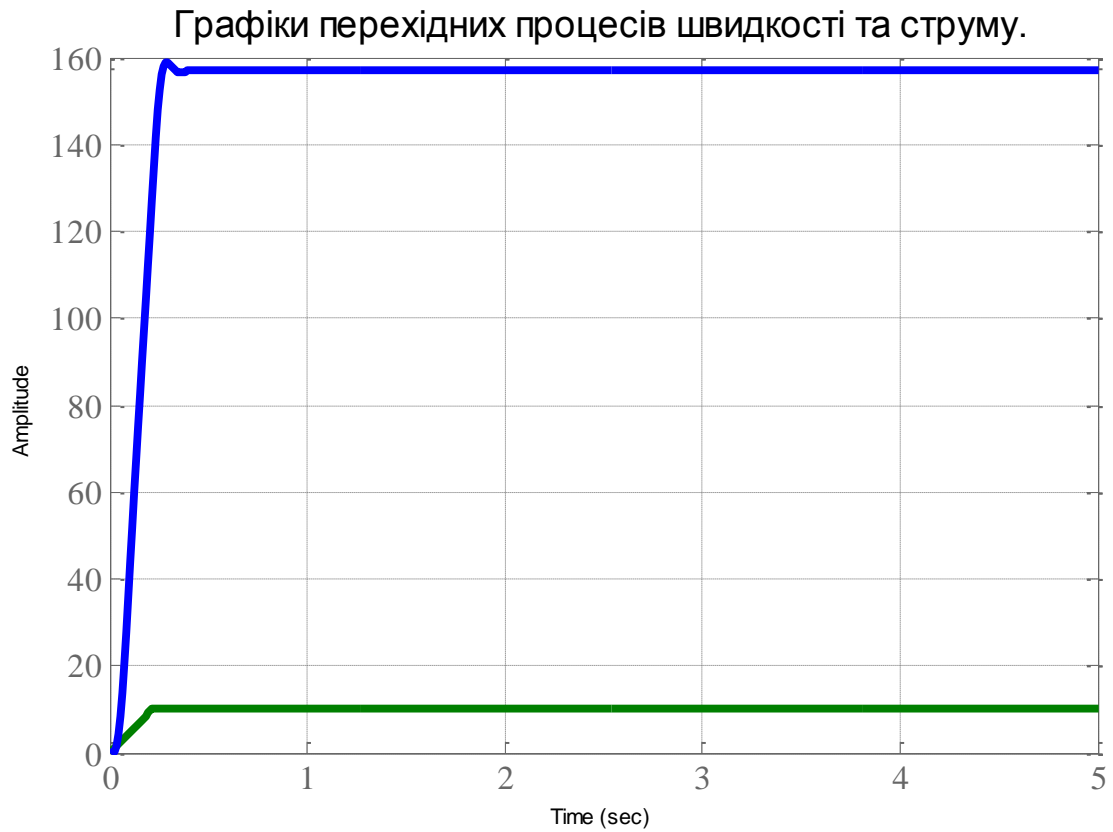


Рис.5.19 Графіки перехідних процесів.

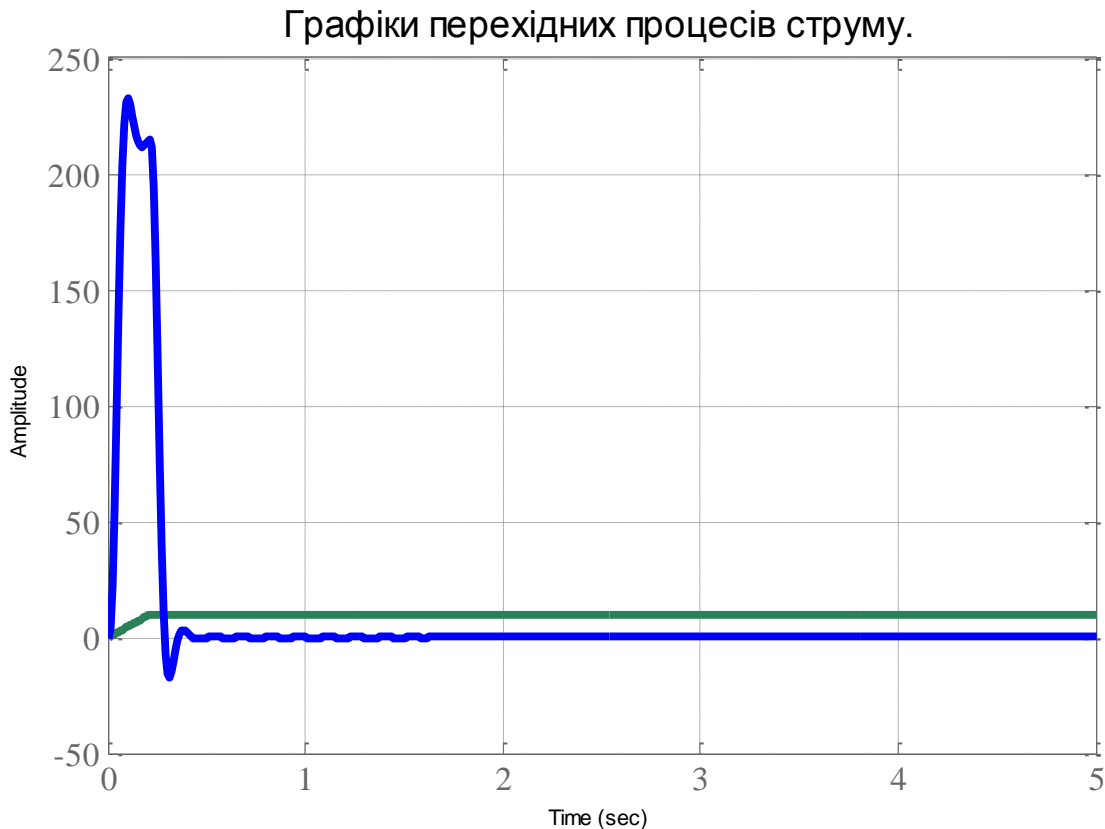


Рис. 5.20 Графіки перехідних процесів.

Моделювання системи керування електродвигуном на основі систем рівнянь є найбільш загальним методом, який можна реалізувати за допомогою будь-якої мови програмування. Моделювання в MATLAB з використанням Simulink – дещо простіше та наочніше, дає змогу з легкістю створювати і редагувати досить складні системи. Моделювати в MATLAB з використанням пакету Control System Toolbox значно складніше та не дозволяє будувати графіки перехідних процесів при декількох вхідних впливах (пакет призначений для дещо інших цілей – більш глибокого аналізу та синтезу).

Опір якорного ланцюга в нагрітому стані:

$$R_{\text{ном}} = R_{\text{я}}(1 + \alpha(t_{\text{ном}} - t_{\text{хол}})) = 0.017 \cdot (1 + 0.004 \cdot (180 - 201)) \approx 0.016 \text{ [Ом]}$$

де $t_{\text{ном}} = 180^{\circ}\text{C}$ – температура двигуна в нагрітому стані;

$t_{\text{хол}} = 201^{\circ}\text{C}$ – температура двигуна в не нагрітому стані;

$\alpha = 0.004 \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ – температурний коефіцієнт опору для мідної обмотки;

Жорсткість природної механічної характеристики:

$$\beta_e = \frac{C_0}{R_{\text{ном}}} = \frac{0.69}{0.016} \approx 44.2 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с]};$$

де конструктивна постійна двигуна рівна:

$$C_0 = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{110 - 86 \cdot 0.017}{157.01} \approx 0.69 \left[\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right];$$

Кут нахилу механічної характеристики до осі ω рівний:

$$\arctg(\beta_e) = 88.704^\circ;$$

Швидкість ідеального холостого ходу для природної механічної характеристики:

$$\omega_0 = \frac{n_{\text{н}}}{C_0} = \frac{1500}{0.69} \approx 2171.9 \left[\frac{\text{об}}{\text{хв}} \right];$$

Момент короткого замикання:

$$M_{\text{кз}} = \omega_0 \cdot \beta_e = 2171.9 \cdot 44.2 \approx 9.6 \cdot 10^4 \text{ [Н} \cdot \text{м]};$$

Струм короткого замикання:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{ном}}} = \frac{110}{0.016} \approx 7.04 \cdot 10^3 \text{ [A]};$$

Побудова природної електромеханічної та механічної характеристики двигуна рис.5.21, рис. 5.22.

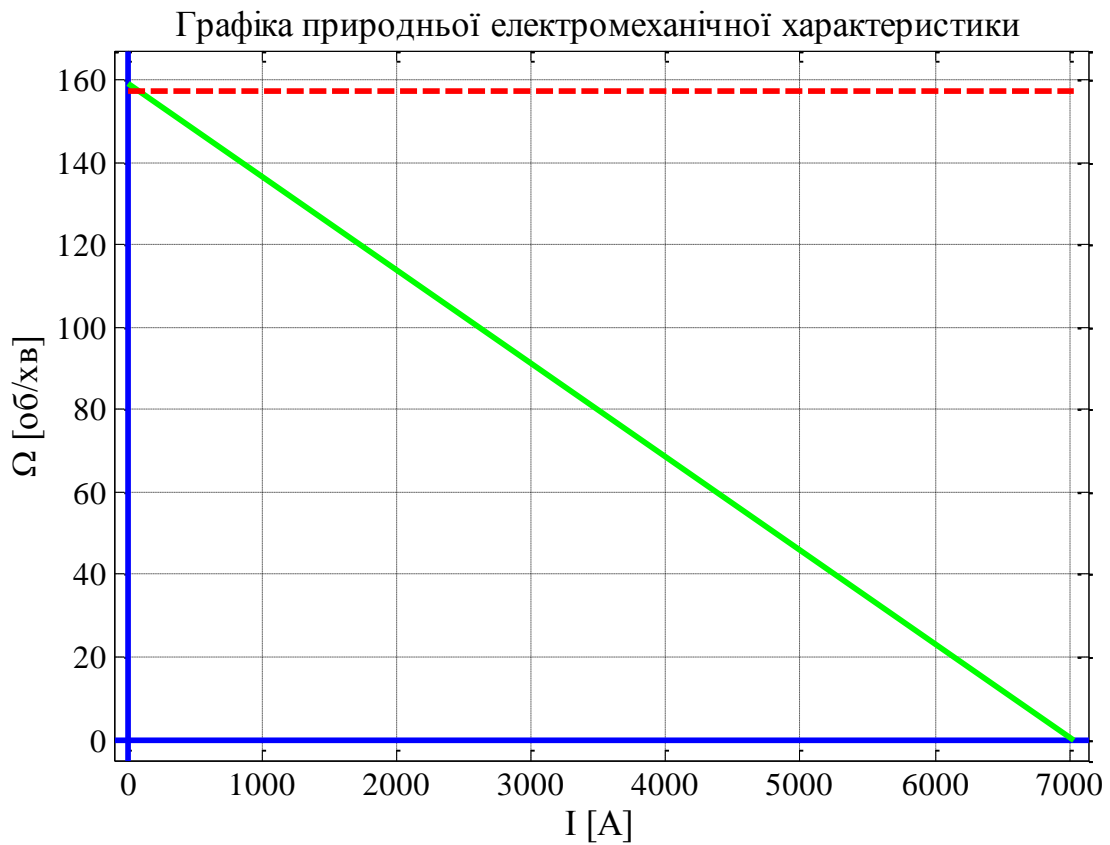


Рис. 5.21 Статична електромеханічна характеристика двигуна.

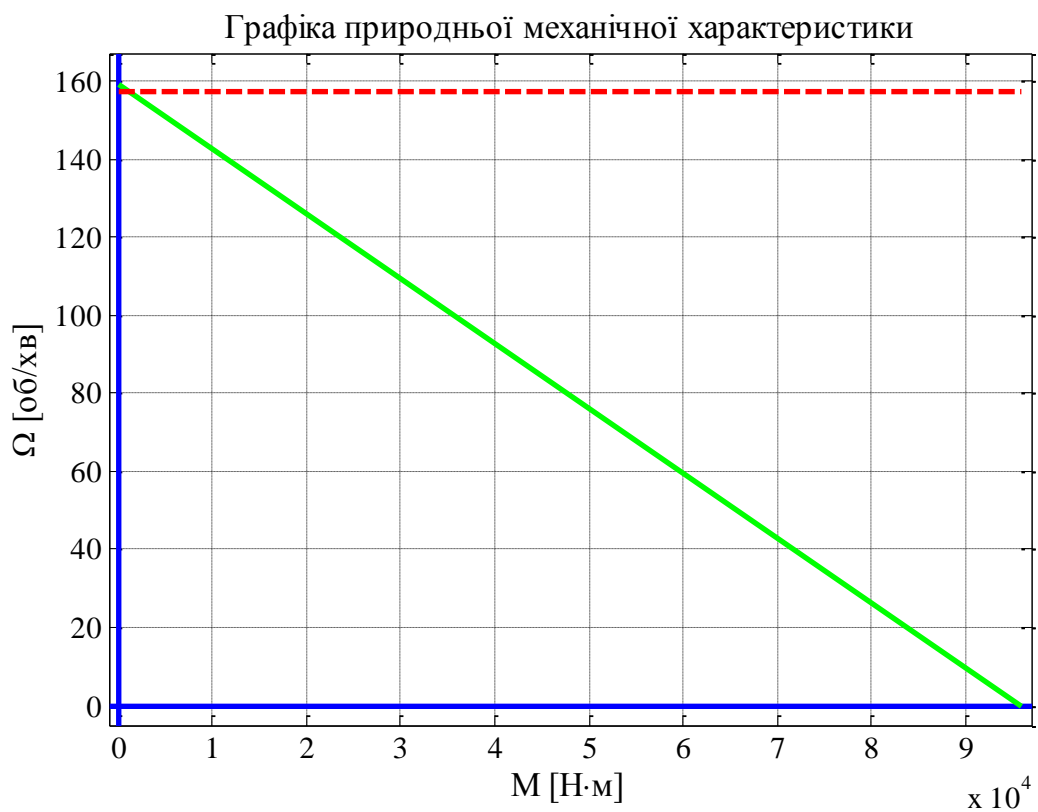


Рис. 5.22 Статична механічна характеристика двигуна.

Основні параметри передаточної функції двигуна.

Задається величина максимального статичного струму:

$$I_{max} = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 86 = 172 \text{ [A]};$$

Опір насиченого ключа:

$$R_{tr} = \frac{U_{тип}}{I_{max}} = \frac{2.1}{172} \approx 0.012 \text{ [Ом]};$$

Еквівалентний опір якорного ланцюга:

$$R_{я экв} = R_{ном} + R_{t2} = 0.016 + 0.012 = 0.028 \text{ [Ом]};$$

Механічна постійна часу з урахуванням приведенного моменту інерції:

$$T_m = \frac{R_{я экв} \cdot j_{дв} \cdot N_m}{C_0} = \frac{0.028 \cdot 0.1 \cdot 2}{0.69} \approx 0.008 \text{ [с]};$$

де коефіцієнт, що враховує зміну моменту інерції механічної частини привода, в залежності від завантаження скіпа рівний:

$$N_m = 2 \div 8;$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я экв}} = \frac{4.26 \cdot 10^{-4}}{0.028} \approx 0.015 \text{ [с]};$$

Коефіцієнт підсилення (передачі) двигуна:

$$k_{дв} = \frac{1}{C_0} = \frac{1}{0.69} \approx 1.45;$$

Передаточна функція двигуна:

$$\begin{aligned} W_{дв}(p) &= \frac{k_{дв}}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1} = \frac{1.45}{0.008 \cdot 0.015 \cdot p^2 + 0.008 \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1.173 \cdot 10^4}{p^2 + 65.3p + 8103}; \end{aligned}$$

Відносна постійна часу:

$$m = \frac{T_m}{T_{я}} = \frac{0.008}{0.015} \approx 0.53;$$

Коефіцієнт демпфування:

$$\xi = \frac{\sqrt{m}}{2} = \frac{\sqrt{0.53}}{2} \approx 0.36;$$

Розрахунок параметрів налаштування контуру струму над технічним оптимумом:

Коефіцієнт підсилення підсилювача датчика струму

$$k_{\text{дт}} = k_{\text{удт}} \cdot \frac{U_{\text{ш}}}{I_{\text{ш}}} = 100 \cdot \frac{0.075}{215} = 0.035 \left[\frac{\text{В}}{\text{А}} \right];$$

де $k_{\text{удт}} = 100$;

Коефіцієнт приведення:

$$k_{\text{при}} = \frac{U_{\text{зс}}}{k_{\text{дт}} \cdot I_{\text{max}}} = \frac{10}{0.035 \cdot 172} = 1.67;$$

Коефіцієнт передачі в ланцюгу зворотного зв'язку складає:

$$k_{\text{т}} = k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{при}} = 0.035 \cdot 1.67 = 0.058;$$

Для аналізу стійкості використовується критерій Найквіста, будується годограф рис.5.23.

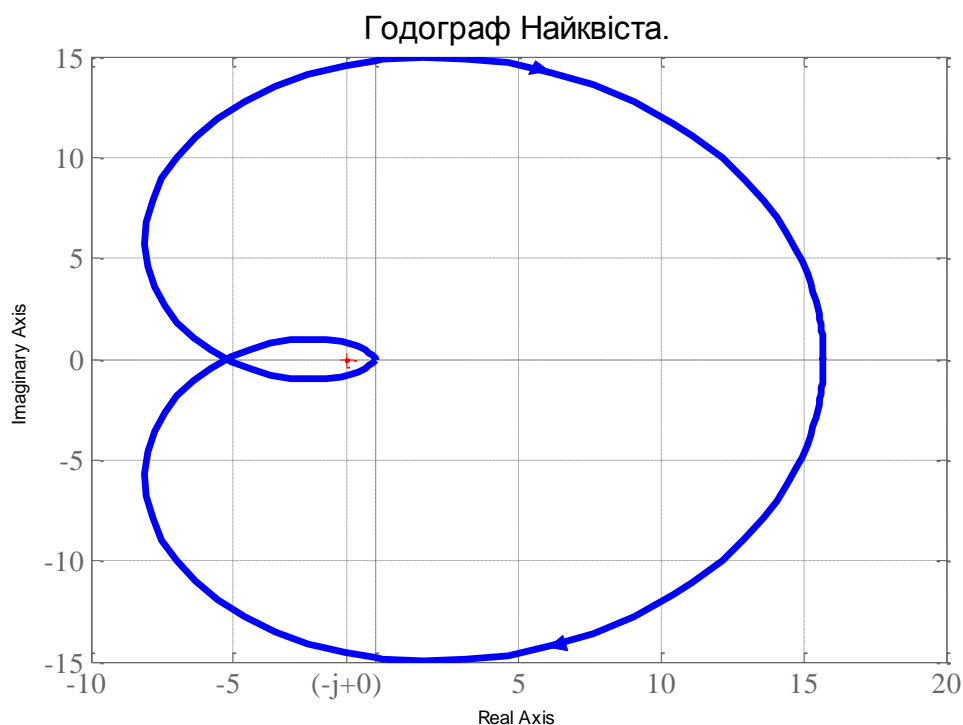


Рис. 5.23 Годограф Найквіста.

Оскільки годограф Найквіста охоплює точку $(-j + 0)$, то система нестійка. В цьому випадку потрібно застосовувати корекцію системи з використанням коректуючої ланки.

Передаточна функція коректуючої ланки має вигляд:

$$W_{\text{кор}}(p) = \frac{1}{p + 10};$$

Передаточна функція скорегованої системи буде мати вигляд:

$$W_{\text{е кор}}(p) = W_c(p) \cdot W_{\text{кор}}(p) = \frac{15.7}{8 \cdot 10^{-6}p^4 + 0.00088p^3 + 0.048p^2 + 1.4p + 10};$$

Побудова годографа Найквіста по скорегованій передаточній функції системи (рис. 5.24):

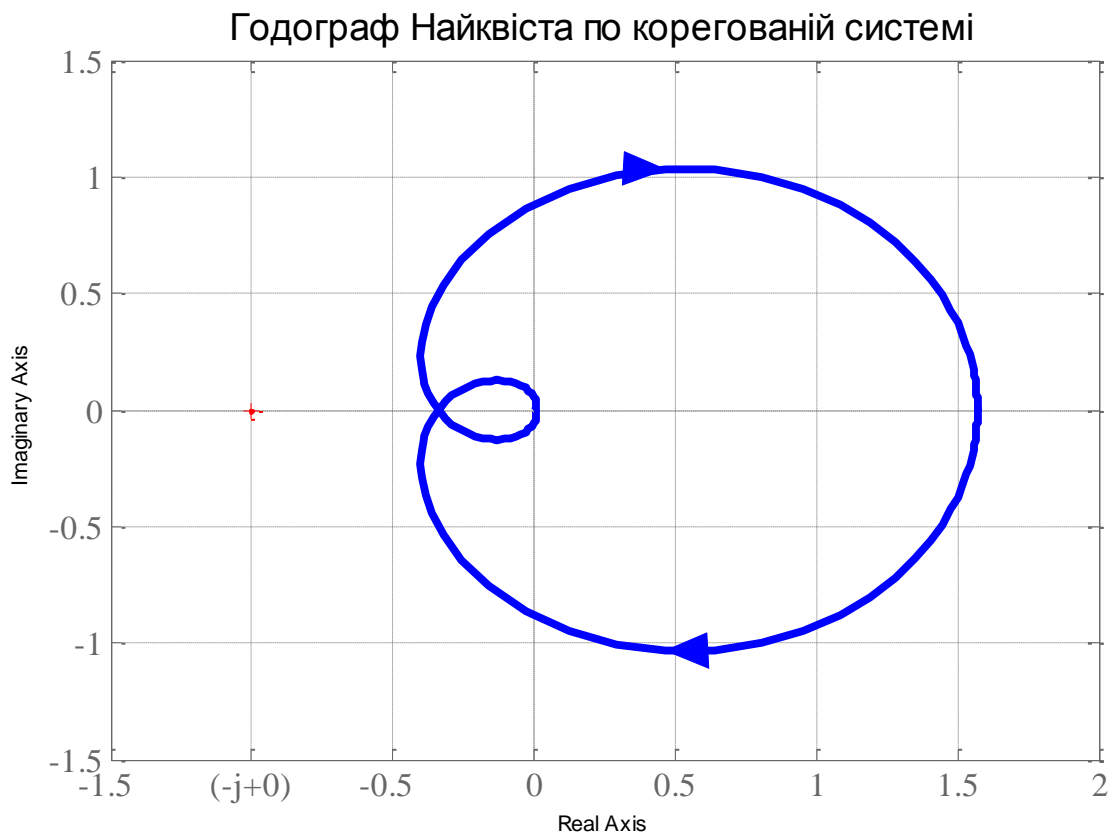


Рис. 5.24 Годограф Найквіста по скорегованій передаточній функції.

Побудова АЧХ та ФЧХ скорегованої системи для визначення частоти зрізу та запасу стійкості рис. 5.25:

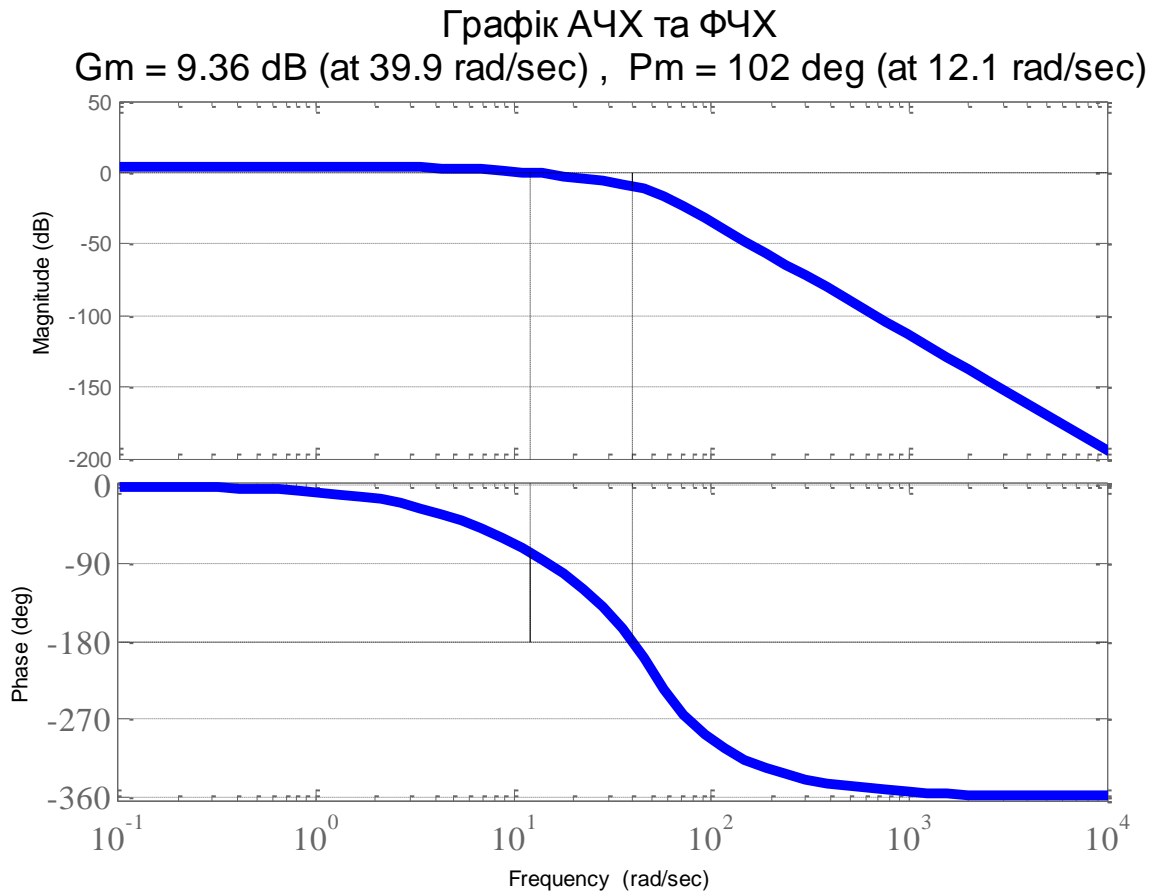


Рис. 5.25 Графік АЧХ та ФЧХ.

Як видно з графіка, запас стійкості по амплітуді на частоті зрізу рівний 9.36 дБ, який більший за мінімальний запас 8 дБ.

Запас стійкості по фазі на частоті зрізу рівний 102° , який більший за мінімальний запас $30^\circ - 40^\circ$.

Побудова графіку дійсної частотної характеристики замкнутої системи (рис. 5.26):

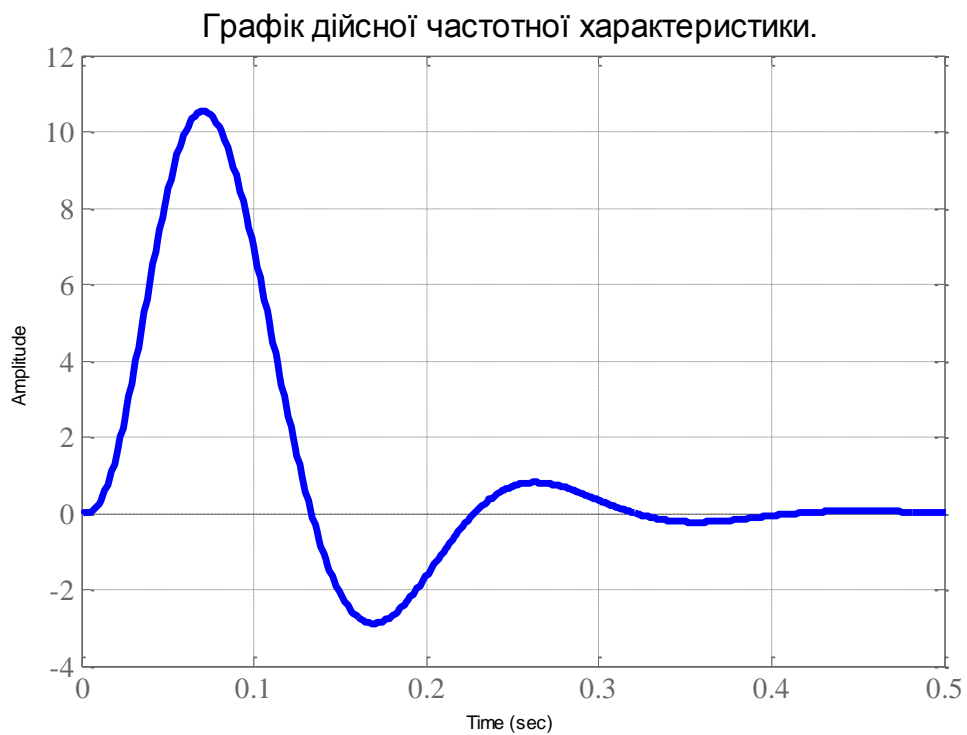


Рис. 5.26 Дійсна частотна характеристика замкнутої системи.

Побудова перехідного процесу системи (рис. 5.27):

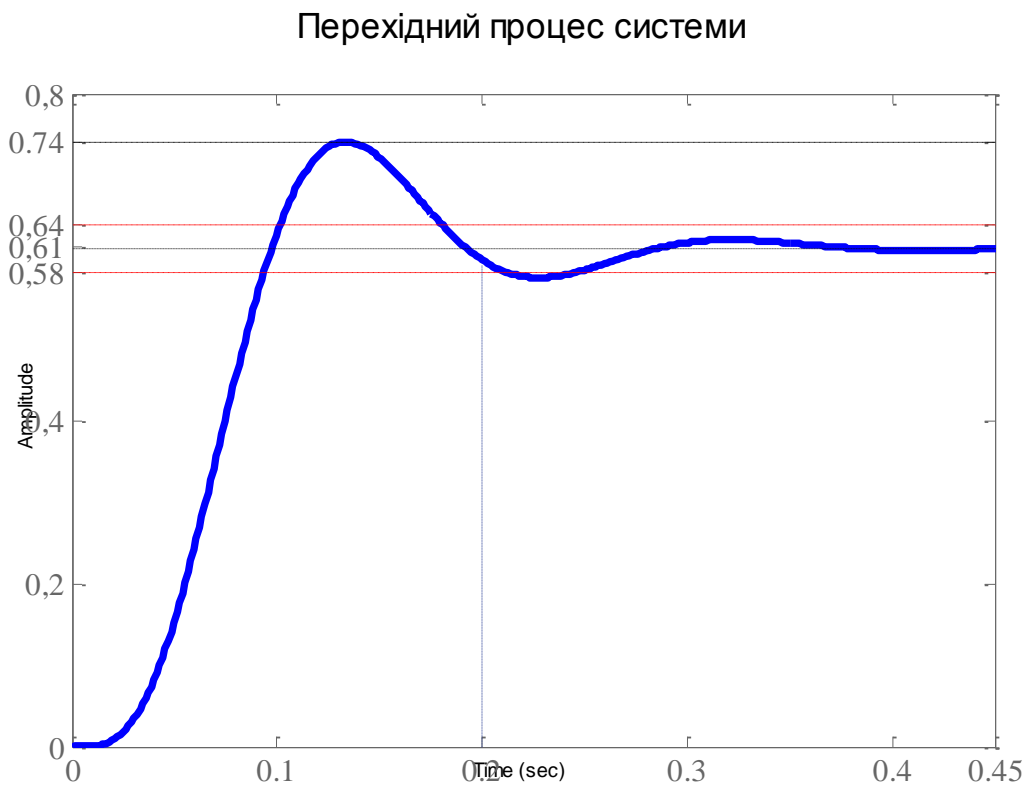


Рис. 5.27 Перехідний процес замкнутої системи.

З графіку видно, що час регулювання складає 0.26 с, а перерегулювання – 21%.

5.5 Розрахунок випрямляча джерела живлення.

В якості схеми випрямлення обирається однофазна мостова схема з наступними параметрами:

- 1) Число фаз $m = 1$;
- 2) Відношення середньої випрямленої напруги до напруги у вторинній обмотці трансформатора: $\frac{U_d}{U_2} = 1.11$;
- 3) Відношення зворотної напруги на вентилі до середньої випрямленої напруги: $\frac{U_{обр}}{U_d} = 1.57$;
- 4) Відношення потужності трансформатора до вихідної потужності випрямляча: $\frac{P_T}{P_d} = 1.21$;
- 5) Коефіцієнт використання вентиля по струму: $k_I = 0.78$;
- 6) Частота пульсацій: $f_{\Pi} = 100$;
- 7) Напруга на виході випрямляча: $U_d = 274 \text{ В}$;
- 8) Струм навантаження випрямляча: $I_d = 180 \text{ А}$.

Зворотна напруга на вентилі:

$$U_{обр} = 1.57 \cdot U_d = 1.57 \cdot 275 = 430.18 \text{ [В]};$$

$$I_B = 0.5 \cdot I_d = 0.5 \cdot 180 = 90 \text{ [А]};$$

По обчислюваним значенням I_B та заданим температурним режимом роботи випрямляча обирається діод Д141-100 з наступними параметрами:

- 1) Прямий постійний струм: $I_{пр} = 100 \text{ А}$;
- 2) Найбільша зворотна напруга: $U_{обр} = 1000 \text{ В}$;
- 3) Падіння напруги на відкритому діоді: $U_{пр} = 1.45 \text{ кГц}$;
- 4) Діапазон допустимих робочих температур: $T = -60 \dots + 90^\circ\text{С}$.

Визначення диференціального опору вентиля:

$$\eta_B = 1.2 \cdot \frac{U_{\text{пр}}}{T_{\text{пр}}} = 1.2 \cdot \frac{1.45}{100} = 0.0174 \text{ [Ом];}$$

Опір плеча випрямляючого моста складає:

$$\eta_{\text{п}} = 2 \cdot \eta_B = 2 \cdot 0.0174 = 0.0338 \text{ [Ом];}$$

Орієнтовне значення активного опору фазового випрямляча:

$$\eta_{\phi} = \eta_{\text{п}} + \frac{k_2 \cdot R_{\text{н}}}{f_c \cdot B_m} \cdot \sqrt[4]{\frac{N \cdot f_c \cdot B_m}{I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}}}} = 0.0388 + \frac{4 \cdot 1.52}{50 \cdot 0.7} \cdot \sqrt[4]{\frac{2 \cdot 50 \cdot 0.7}{180 \cdot 274}} \approx 0.069 \text{ [Ом];}$$

де $k_2 = 4$ – коефіцієнт схеми випрямляча;

$N = 2$ – число стержнів трансформатора;

$B_m = 0.7$ Тл – максимальна індукція сталі сердечника;

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{д}}}{I_{\text{д}}} = \frac{274}{180} \approx 1.5 \text{ [Ом]} \text{ – опір навантаження;}$$

Визначення індуктивності розсіювання обмоток трансформатора при частоті напруги мережі 50 Гц:

$$L_s = K_L \cdot \frac{R_{\text{н}} \cdot 10^{-3}}{f_c \cdot B_m} \cdot \sqrt{\frac{N^3 \cdot I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}}}{f_c \cdot B_m}} = 6.4 \cdot \frac{1.52 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 0.7} \cdot \sqrt{\frac{2^3 \cdot 180 \cdot 274}{50 \cdot 0.7}} \approx 0.03 \text{ [Гн];}$$

де $K_L = 6.4$ – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення.

Індуктивний опір обмоток трансформатора:

$$x_{\text{т}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot L_s = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.03 = 9.28 \text{ [Ом];}$$

Розрахована випрямлена напруга ненавантаженого випрямляча:

$$U_{\text{хх}} = U_{\text{д}} + I_{\text{д}} \left(\eta_{\phi} + \frac{m x_{\text{т}}}{m \pi} \right) 10^{-3} = 274 + 180 \left(0.069 + \frac{6 \cdot 9.28}{6 \cdot 3.14} \right) 10^{-3} \approx 274.54 \text{ [В]}$$

Фактична зворотна напруга на вентилі:

$$U_{\text{обр т}} = \sqrt{2} \cdot 1.1 \cdot U_{\text{хх}} = \sqrt{2} \cdot 1.1 \cdot 274.54 \approx 427.1 \text{ [В];}$$

Для зниження пульсації випрямленої напруги на виході перетворювача випрямляча встановлюється зважуючий фільтр. Ефективність згладжуючого фільтра оцінюється по його здатності зменшувати амплітуду пульсації, тобто по значенню коефіцієнта згладження.

Розрахунок коефіцієнта згладження:

$$q_c = \frac{\frac{U'_m(1)}{U_d}}{\frac{U'_m(2)}{U_d}} = \frac{\frac{183.6}{274}}{\frac{1}{274}} = 183.6;$$

де $U'_m(1) = 183.6$ – амплітуда основної гармоніки пульсації на вході фільтра;

$U'_m(2) = 1$ – амплітуда основної гармоніки пульсації на виході фільтра;

Фільтр обирається Г-подібний LC-фільтр в якому добуток:

$$L_g \cdot C = \frac{g_c + 1}{(m_n \cdot \omega_c)^2} = \frac{183.6 + 1}{(100 \cdot 314.16)^2} \approx 1.87 \cdot 10^{-7};$$

де $m_n = 100$ Гц – частота пульсації випрямленої напруги;

$$\omega_c = 314.16 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

Визначення мінімального значення індуктивності дроселя:

$$L_{д \text{ мин}} = \frac{2 \cdot R_{\text{нагр}}}{(m_n^2 - 1) \cdot m_n \cdot \omega_c} = \frac{2 \cdot 1.5}{(100^2 - 1) \cdot 100 \cdot 314.16} \approx 9.55 \cdot 10^{-9} [\text{Гн}];$$

По розрахованому значенню $L_{д \text{ мин}}$, обирається дросель фірми ДПМ200-100 з наступними параметрами:

1) Індуктивність дроселя: $L_d = 10^{-3}$ Гн;

2) Номінальний постійний струм: $I_{\text{нп}} = 200$ А;

Розрахунок ємності конденсатора фільтра:

$$C = \frac{L_g \cdot C}{L_d} = \frac{1.87 \cdot 10^{-7}}{10^{-3}} = 1.87 \cdot 10^{-4} [\text{Ф}];$$

Робоча напруга конденсатора:

$$U_{\text{сраб}} = 1.11 \cdot \sqrt{2} \cdot U_d = 1.11 \cdot \sqrt{2} \cdot 274 \approx 430.12 [\text{В}];$$

По розрахованому значенню ємності C та робочій напрузі – обирається конденсатор типу K50-78-450В-220мкФ \pm 20%.

Список використаної літератури.

1. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2000.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя. 3 том – 7-е изд., перераб и доп. М.: Машиностроение, 1992.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972.
4. Герман-Галкин С.Г., Лебедев В.Д., Марков Б.А. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования: Учебное пособие. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998.
6. Карнаухов Н.Ф. Стабилизированный вторичный источник питания систем управления роботов: Метод. Указания. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1991.
7. Рапутов Б.М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий. М.: Металлургия, 1990.
8. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1985.