

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ
ЗМІННОГО СТРУМУ

Методичні вказівки до практичних занять

Одеса 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ
ЗМІННОГО СТРУМУ

Методичні вказівки
до практичних занять
для магістрів за фахом
141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Затверджено
на засіданні кафедри
електромеханічної інженерії
Протокол №7 від 10.01.2025

Одеса 2025

Методичні вказівки до практичних занять з навчальної дисципліни «Векторне керування електродвигунами змінного струму» (практичні заняття 1-7) для здобувачів спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» другого (магістерського) рівня вищої освіти ОП «Електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття освіти.// Уклад. В.А. Войтенко. – Одеса: НУ «Одеська політехніка» 2025. - 42 с.

Автор В.А. Войтенко,
канд. техн. наук, доц.

ВСТУП

Метою практичних занять є набуття студентами навичок застосування отриманих знань для розв'язання інженерних задач з розрахунку та проектування системи керування електродвигунами змінного струму.

Електроприводи змінного струму (ЕП) на базі асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора з статичними тиристорними або транзисторними перетворювачами напруги масово застосовуються в різних технологічних механізмах з важкими умовами роботи електричних двигунів і з жорсткими вимогами до їх надійності. Це пояснюється тим, що в асинхронному двигуні з короткозамкненою обмоткою ротора немає контактних кільць і колекторного вузла. Поява замкнених систем керування ЕП з векторним управлінням струмом обмотки статора асинхронного двигуна привела до значного покращення статичних і динамічних характеристик електроприводів змінного струму. Тому електроприводи змінного струму почали застосовувати замість електроприводів постійного струму в системах керування швидкістю робочих органів технологічних механізмів з високими вимогами до статичних і до динамічних характеристик електроприводів.

На практичних заняттях розглянуто поетапне проектування системи керування швидкістю валу асинхронного двигуна з векторним принципом керування струмом обмотки статора [1...4]. У технічній літературі цей принцип називають принципом орієнтованого за полем векторного керування.

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

1.1. На базі основних технічних параметрів асинхронних електричних двигунів необхідно розробити систему керування швидкістю механізму головного руху металообробного верстату. Віріанти основних технічних параметрів асинхронних двигунів наведені у таблиці 1.1:

- номінальна потужність електродвигуна, P_H [кВт];
- значення пускового струму по відношенню до номінального значення, i_H [відн. од.];
- номінальне значення ковзання вала електродвигуна, s_H [%];
- момент інерції ротора двигуна, J_d [кгм²];
- номінальне значення ККД, η_H [%];
- номінальне значення коефіцієнта потужності, $\cos\phi_H$ [відн. од.];
- параметри Т-подібної електричної еквівалентної схеми асинхронного двигуна, X_μ , R'_s , X'_s , R''_r , X''_r , [відн. од.].

Таблиця 1.1

Віріанти основних технічних параметрів асинхронних двигунів

№ варіанта	Типорозмір електродвигуна	P_{2H} , кВт	Електромеханічні параметри			Енергетичні параметри		Параметри схеми заступу, відн.од.				
			i_H , в.од.	s_H , %	J_d , кг*м ²	ККД, η_H , %	$\cos\phi_H$	у номінальному режимі				
								X_μ	R'_s	X'_s	R''_r	X''_r
1	4AA63A6Y3	0,18	3,0	11,5	0,0018	56,0	0,52	1,3	0,24	0,15	0,22	0,18
2	4AA63B6Y3	0,25	3,0	10,8	0,0022	59,0	0,62	1,4	0,18	0,13	0,21	0,19
3	4AA71A6Y3	0,37	4,0	9,2	0,0017	64,5	0,60	1,3	0,17	0,12	0,15	0,16
4	4AA71B6Y3	0,55	4,0	10,0	0,0020	67,5	0,71	1,4	0,16	0,11	0,15	0,17
5	4A80A6Y3	0,75	4,0	8,4	0,0031	69,0	0,74	1,5	0,16	0,12	0,12	0,20
6	4A80B6Y3	1,1	4,0	8,0	0,0046	74,0	0,74	1,6	0,12	0,11	0,11	0,19
7	4A90L6Y3	1,5	4,5	6,4	0,0073	75,0	0,74	1,8	0,11	0,11	0,088	0,21
8	4A100L6Y3	2,2	5,0	5,1	0,013	81,0	0,73	1,9	0,090	0,11	0,067	0,21
9	4A112MA6Y3	3,0	6,0	4,7	0,017	81,0	0,76	1,9	0,085	0,074	0,063	0,10
10	4A112MB6Y3	4,0	6,0	5,1	0,021	82,0	0,81	2,0	0,077	0,073	0,062	0,11
11	4A132S6Y3	5,5	6,0	3,3	0,040	85,0	0,80	1,9	0,067	0,072	0,041	0,11
12	4A132M6Y3	7,5	6,0	3,2	0,058	85,5	0,81	2,1	0,060	0,070	0,040	0,11
13	4A160S6Y3	11,0	6,0	2,7	0,14	86,0	0,86	3,0	0,073	0,11	0,030	0,15
14	4A160M6Y3	15,0	6,0	2,6	0,18	87,5	0,87	3,0	0,062	0,10	0,028	0,16
15	4A180M6Y3	18,5	6,0	2,4	0,22	88,0	0,87	2,9	0,056	0,11	0,026	0,13
16	4A200M6Y3	22,0	6,5	2,3	0,40	90,0	0,90	4,1	0,050	0,11	0,024	0,14

17	4A200L6Y3	30,0	6,5	2,1	0,45	90,5	0,90	3,7	0,046	0,12	0,022	0,13
18	4A225M6Y3	37,0	6,5	1,8	0,74	91,0	0,89	3,7	0,042	0,10	0,019	0,13
19	4A250S6Y3	45,0	6,5	1,4	1,2	91,5	0,89	3,8	0,037	0,090	0,015	0,14
20	4A250M6Y3	55,0	6,5	1,3	1,3	91,5	0,89	3,4	0,034	0,083	0,014	0,13
21	4AA50A4Y3	0,06	2,5	8,1	0,000029	50,0	0,60	1,2	0,16	0,17	0,22	0,17
22	4AA50B4Y3	0,09	2,5	8,6	0,000033	55,0	0,60	1,2	0,13	0,16	0,21	0,17
23	4AA56A4Y3	0,12	3,5	8,2	0,00070	63,0	0,65	1,2	0,18	0,087	0,15	0,15
24	4AA56B4Y3	0,18	3,5	8,9	0,00079	64,0	0,64	1,3	0,18	0,080	0,16	0,17
25	4AA63A4Y3	0,25	4,0	9,0	0,0012	68,0	0,65	1,4	0,17	0,082	0,14	0,17
26	4AA63B4Y3	0,37	4,0	9,0	0,0014	68,0	0,69	1,4	0,17	0,086	0,14	0,18
27	4A71A4Y3	0,55	4,5	7,2	0,0013	70,5	0,70	1,5	0,13	0,056	0,11	0,20
28	4A71B4Y3	0,75	4,5	7,5	0,0014	72,0	0,73	1,5	0,11	0,084	0,11	0,20
29	4A80A4Y3	1,1	5,0	5,4	0,0032	75,0	0,81	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12
30	4A80B4Y3	1,5	5,0	5,8	0,0033	77,0	0,83	1,9	0,12	0,078	0,060	0,12
31	4A90L4Y3	2,2	6,0	5,1	0,0056	80,0	0,83	2,1	0,098	0,076	0,060	0,13
32	4A100S4Y3	3,0	6,0	4,4	0,0087	82,0	0,83	2,2	0,078	0,079	0,053	0,13
33	4A100L4Y3	4,0	6,0	4,6	0,011	84,0	0,84	2,4	0,057	0,079	0,053	0,14
34	4A112M4Y3	5,5	7,0	3,6	0,017	85,5	0,85	2,8	0,054	0,078	0,041	0,13
35	4A132S4Y3	7,5	7,5	2,9	0,028	87,5	0,86	3,0	0,048	0,085	0,033	0,13
36	4A132M4Y3	11,0	7,5	2,8	0,04	87,5	0,87	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13
37	4A160S4Y3	15,0	7,0	2,3	0,10	88,5	0,88	4,0	0,047	0,08	0,025	0,13
38	4A160M4Y3	18,5	7,0	2,2	0,13	89,5	0,88	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13
39	4A180S4Y3	22,0	6,5	2,0	0,19	90,0	0,90	4,0	0,041	0,080	0,021	0,12
40	4A180M4Y3	30,0	6,5	1,9	0,23	91,0	0,89	3,9	0,034	0,088	0,018	0,12

1.2. Стосовно механічної частини електроприводу (ЕП) будемо вважати, що момент сил навантаження (статичний момент) є реактивним, і його значення не залежить від швидкості обертання валу АД. Передавальний механізм є абсолютно жорстким і не має зазорів. Найбільше тривале значення моменту сил навантаження повинно відповідати номінальному значенню струму статора АД при заданій швидкості вала АД. Відповідно до тезнічного завдання (таблиця 1.2) найбільше значення кутової швидкості обертання валу АД в три рази перевищує номінальне синхронне значення кутової швидкості вала АД, яке відповідає номінальному значенню частоти напруги на обмотці статора (50 Гц).

Будемо вважати, що момент інерції робочого органу технологічного механізму, приведений до валу двигуна, ($J_{\text{МЕХ}}$) дорівнює моменту інерції валу двигуна ($J_{\text{Д}}$).

Пояснення до практичних занять даються на прикладі варіанту №12. Тому параметри заданного варіанту з таблиці 1.1 і заносимо до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Параметри двигуна для варіанту №12.

№	Найменування параметра або фізичної величини	Позначення	Розмірність	Значення
1	Тип двигуна	4A132M6Y3		
2	Номінальне значення потужності	P_{2H}	кВт	7,5
3	Кратність пускового струму	$i_{\text{П}}=I_{\text{СП}}/I_{\text{SH}}$	в. о.	6
4	Номінальне ковзання	S_{H}	%	3,2
5	Момент інерції ротора двигуна	$J_{\text{Д}}$	кг·м ²	0,058
6	Номінальне значення ККД двигуна	$\eta_{\text{НОМ}}$	%	85,5
7	Номінальне значення $\cos\varphi$ двигуна	$\cos\varphi_{\text{H}}$	в. о.	0,81
8	Опір взаємної індукції обмотки статора і обмотки ротора двигуна	X_{μ}	в. о.	2,1
9	Активний опір фази обмотки статора двигуна	R'_{S}	в. о.	0,06
10	Індуктивний опір фази обмотки статора двигуна	X'_{S}	в. о.	0,07
11	Активний опір фази обмотки ротора двигуна	R''_{R}	в. о.	0,04
12	Індуктивний опір фази обмотки ротора двигуна	X''_{R}	в. о.	0,11
13	Найбільше значення кутової швидкості обертання валу АД	$\omega_{\text{MAX}}/\omega_{0\text{H}}$	в. о.	3

	по відношенню до номінальної синхронної кутової швидкості обертання валу АД			
--	--	--	--	--

2 Практичне заняття №1.

«Визначення параметрів еквівалентної електричної схеми АД».

Мета заняття: вивчення методики визначення параметрів еквівалентної схеми АД.

2.1 На рисунку 1.1 показано Т-подібну еквівалентну електричну схему асинхронного двигуна (АД).

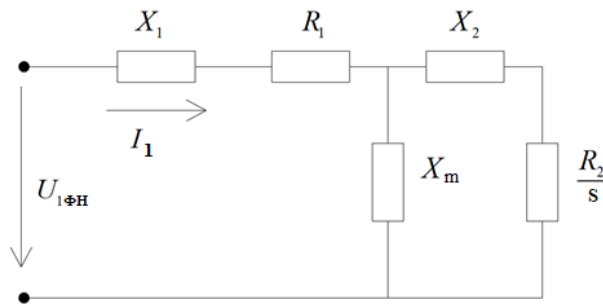


Рисунок 2.1 – Еквівалентна електрична схема АД.

2.2 Визначаємо номінальне середньоквадратичне значення фазного струму статора за формулою (1.1):

$$I_{\Phi H} = \frac{P_{2H}}{3 U_{\Phi H} \cos \varphi_H}, \quad (1.1)$$

Підставляємо до формули (1.1) значення параметрів і фізичних величин, які відповідають заданому варіанту (в даному прикладі це є варіант 12):

$$I_{\Phi H} = \frac{7500}{3 \times 220 \times 0,855 \times 0,81} = 16,41 \text{ .}$$

2.3 Визначаємо номінальний опір фази обмотки статора за формулою (1.2):

$$R_{H.} = \frac{U_{\Phi H}}{I_{\Phi H}}, \quad (1.2)$$

Підставляємо до формули (1.2) номінальне середньоквадратичне значення фазної напруги і номінальне середньоквадратичне значення фазного струму статора, які відповідають заданому варіанту:

$$R_H = \frac{220}{16,41} = 13,41$$

2.4 Визначаємо абсолютні значення активних і індуктивних опорів еквівалентної схеми АД за формулами (1.3)-(1.7):

$$R_M = X_{R_H} \quad (1.3)$$

$$R_H = R_S' R_I \quad (1.4)$$

$$R_H = X_S' R_I \quad (1.5)$$

$$R_H = R_R'' R_I \quad (1.6)$$

$$R_H = X_R'' R_I \quad (1.7)$$

За формулами (1.3)-(1.7) розраховуємо абсолютні значення активних і індуктивних опорів еквівалентної схеми АД:

$$R_M = 2,1 \cdot 13,41 = 28,161$$

$$R_M = 0,06 \cdot 13,41 = 0,805$$

$$R_M = 0,07 \cdot 13,41 = 0,939$$

$$R_M = 0,04 \cdot 13,41 = 0,536$$

$$R_M = 0,11 \cdot 13,41 = 1,475$$

2.5 Визначаємо повну індуктивність фази обмотки статора і повну індуктивність фази обмотки ротора та взаємну індуктивність обмотки статора і обмотки ротора АД за формулами (1.8)-(1.10):

$$L_{\text{H}} = \frac{X_1 + X_m}{2\pi f_{1\text{H}}}, \quad (1.8)$$

$$L_{\text{H}} = \frac{X_2 + X_m}{2\pi f_{1\text{H}}}, \quad (1.9)$$

$$L_{\text{H}} = \frac{X_m}{2\pi f_{1\text{H}}}, \quad (1.10)$$

За формулами (1.8)-(1.10) отримаємо повну індуктивність фази обмотки статора і повну індуктивність фази обмотки ротора, а також взаємну індуктивність обмотки статора і обмотки ротора АД:

$$L_{\text{H}} = \frac{0,939 + 28,161}{2\pi \cdot 50} = 0,0926$$

$$L_{\text{H}} = \frac{1,475 + 28,161}{2\pi \cdot 50} = 0,0943$$

$$L_{\text{H}} = \frac{28,161}{2\pi \cdot 50} = 0,0896$$

2.6 При роботі АД у режимі ідеального неробочого ходу ковзання ротора відносно магнітного поля буде дорівнювати нулю ($s=0$). Тому на підставі еквівалентної схеми АД (Рисунок.1.1) опір обмотки ротора буде нескінченно великим. Таким чином, в режимі ідеального неробочого ходу струм в обмотці ротора буде дорівнювати нулю ($I_{2\text{X.X.}}=0$). З врахуванням цієї особливості на підставі схеми заміщення АД можна записати формулу (1.11) для визначення середньоквадратичного значення синусоїдального струму намагнічування АД, який працює в режимі ідеального неробочого ходу:

$$I_{\text{XX}} = \frac{U_{\Phi\text{H}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}, \quad (1.11)$$

Підставляємо до формули (1.11) номінальне середньоквадратичне значення фазної напруги обмотки статора АД та абсолютні значення

параметрів еквівалентної схеми АД, які відповідають заданому варіанту завдання і які були отримані за формулами (1.3), (1.4), (1.5):

$$I_{X.X.} = \frac{220}{\sqrt{0,8^2 + (0,94 + 28,16)^2}} = 7,56$$

2.7 Будемо вважати амплітудне значення струму намагнічування АД, який працює в режимі ідеального неробочого ходу, за номінальне амплітудне значення струму намагнічування ($I_{1.X.H}$). Відповідно до теорії векторного керування при роботі АД в номінальному режимі номінальне амплітудне значення струму намагнічування має дорівнювати проекції просторового вектора номінального струму статора на вісь «х» системи координат «х-у», яка обертається відносно нерухомого статора АД з синхронною кутовою частотою (Ω_{0EL}) в електричному просторі (рисунок.1.2.). Номінальне амплітудне значення струму намагнічування ($I_{1.X.H}$) визначаємо за формулою (1.12):

$$I_{1.X.H} = \sqrt{2} \cdot I_{1X.X.}, \quad (1.12)$$

Підставляємо до формули (1.12) середньоквадратичне значення синусоїдального струму намагнічування, який було отримано за формулою (1.11) і який відповідає роботі АД в режимі ідеального неробочого ходу:

$$I_{1X.X.} = \sqrt{2} \cdot 7,56 = 10,69$$

2.8 Визначаємо амплітудне значення номінального струму статора. Номінальне амплітудне значення струму статора АД визначаємо за формулою (1.13):

$$I_{\Phi H} = \sqrt{2} \cdot I_1, \quad (1.13)$$

Підставляємо до формули (1.13) номінальне середньоквадратичне значення фазного струму статора, яке було визначено за формулою (1.1):

$$I_{\Phi H} = \sqrt{2} \cdot 16,41 = 23,21$$

2.9 На рисунку 1.2 показано проекції просторового вектора струму статора на осі «х» і «у» системи координат «х-у». За формулою (1.14) відповідно до рисунку 1.2 визначаємо значення проекції просторового вектора струму статора на вісь «у» системи координат «х-у» при роботі АД в номінальному режимі (з номінальним значенням струму в обмотці статора АД):

$$I_{\text{Y.N}} = \sqrt{I_1^2 - I_x^2}, \quad (1.14)$$

На підставі формули (1.14) отримаємо значення проекції просторового вектора струму статора на вісь «у» системи координат «х-у» при роботі АД в номінальному режимі:

$$I_{\text{Y.N}} = \sqrt{23,21^2 - 10,69^2} = 20,60$$

2.10 Визначаємо номінальне амплітудне значення просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора при роботі АД в режимі ідеального неробочого ходу при номінальному значенні струму намагнічування АД за формулою (1.15):

$$\Psi_{2.N} = B_m I_{\text{LX.N}}, \quad (1.15)$$

За формулою (1.15) отримаємо номінальне амплітудне значення просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора:

$$\Psi_{2.N} = 0,896 \cdot 10,69 = 0,958$$

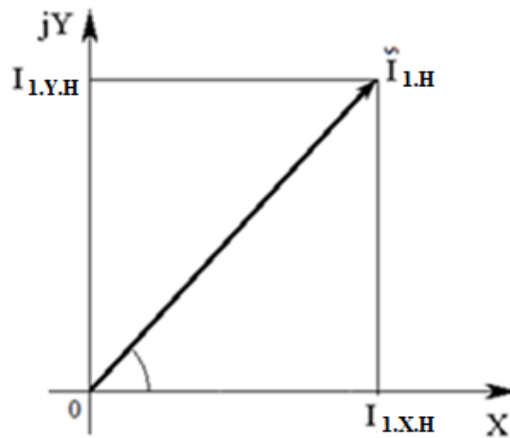


Рисунок 2.2. Проекції просторового вектора струму статора на осі «x» і «y» системи координат «x-y».

2.11 Визначаємо амплітудне значення просторового вектора повного потокозчеплення обмотки статора АД при роботі АД в режимі ідеального холостого ходу (з номінальним значенням струму намагнічування) за формулою (1.16):

$$\psi_{1.H} = B \Phi_{1.x.H}, \quad (1.16)$$

За формулою (1.16) ми отримаємо амплітудне значення просторового вектора повного потокозчеплення обмотки статора АД при роботі АД в режимі ідеального холостого ходу (з номінальним значенням струму намагнічування):

$$\psi_{1.H} = 0,926 \cdot 10,69 = 0,990$$

2.12 Для перевірки проведених розрахунків визначимо амплітудне значення просторового вектора повного потокозчеплення обмотки статора в режимі ідеального неробочого ходу ($\psi_{s.xx}$), при умові нехтування падінням напруги на активному опорі обмотки статора R_1 . Для цього використаємо загальновідому формулу (1.17):

$$\psi_{1.xx} \approx \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{2\pi f_{1H}}} B \delta. \quad (1.17)$$

За формулою (1.17) отримаємо:

$$\psi_{\text{кх}} \approx \frac{220}{\sqrt{2\pi \cdot 50}} = 0,903$$

2.13 На підставі того, що в режимі ідеального і реального неробочого ходу АД падіння напруги на активному опорі і на індуктивному опорі обмотки статора не дорівнює нулю (тобто $R_1 \neq 0$; $i_1 \neq 0$), то на підставі схеми заміщення АД можна зробити висновок, що має виконуватись нерівність (1.18):

$$\psi_{1.\text{кх}} > \psi_{1.\text{н}} > \psi_{2.\text{н}} . \quad (1.18)$$

Після порівняння результатів розрахунків, отриманих за формулами (1.15), (1.16) і (1.17) можна зробити висновок, що нерівність (1.18) виконується. Тому ця перевірка підтвердила правильність проведених розрахунків.

2.14 Визначаємо значення коефіцієнта, який враховує потік розсіювання обмотки ротора за формулою (1.19):

$$k_{2\sigma} = \frac{L_m}{L_2}, \quad (1.19)$$

За формулою (1.19) ми отримаємо значення коефіцієнта, який враховує потік розсіювання обмотки ротора:

$$k_{2\sigma} = \frac{0,0896}{0,0943} = 0,950$$

2.15 Визначаємо номінальне значення електромагнітного моменту, який розвиває АД, за формулою (1.20):

$$M_{\text{ем.н.}} = \frac{3}{2} k_2 P_{\text{п.н.}} \quad (1.20)$$

За формулою (1.20) отримаємо номінальне значення електромагнітного моменту, який розвиває АД:

$$M_{EM.H.} = \frac{3}{2} \cdot 0,950 \cdot 3 \cdot 0,958 \cdot 20,6 = 84,35 \quad .$$

2.16 Для перевірки вірності проведених розрахунків за формулою (1.21) визначимо номінальне значення механічного моменту, який має розвивати АД відповідно до паспортних параметрів АД, наведених в таблиці В1:

$$M_{H.MEX.} = \frac{P_{2H}}{\omega_H (1-s)}, \quad . \quad (1.21)$$

2.17 Відповідно до формули (1.21) для визначення номінального значення механічного моменту АД, необхідно визначити синхронне значення механічної кутової швидкості обертання валу АД при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора АД ($f_{1.H}=50$ Гц):

$$\omega_H = \frac{2\pi f_{1.H}}{p_{\Pi}}, \quad . \quad (1.22)$$

де $f_{1.H} = 50$ Гц – номінальне значення частоти напруги на обмотці статора АД;

p_{Π} – кількість пар полюсів обмотки статора АД.

2.18 Кількість пар полюсів обмотки статора АД можна визначити за позначенням АД. Наприклад позначення «4А132М6У3» означає, що АД має 6 полюсів. Тому кількість пар полюсів у цього АД дорівнює:

$$p_{\Pi} = \frac{6}{2} = 3.$$

За формулою (1.22) отримаємо синхронне значення механічної кутової швидкості обертання валу АД при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора АД ($f_{1.H}=50$ Гц):

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ c}^{-1}.$$

2.19 За формулою (1.21) отримаємо номінальне значення механічного моменту АД:

$$M_{H.MEX.} = \frac{7500}{104,72 \cdot (1 - 0,032)} = 72,29 \quad .$$

2.20 На підставі результатів розрахунків за формулами (1.20) і (1.21) можна зробити висновок про те, що розраховане номінальне значення електромагнітного моменту АД перевищує номінальне значення механічного моменту АД, визначене за паспортними параметрами АД ($M_{EMH} > M_{H.MEX}$), що відповідає основним положенням теорії електричних машин.

2.21 Оскільки в пункті 1.5 значення струму намагнічування розраховувалось для режиму ідеального холостого ходу АД, тому воно є трохи більшим (на 5-10%) за значення струму намагнічування, яке відповідає номінальному режиму роботи АД. З цього випливає, що розрахункове значення потокозчеплення ротора (пункт 1.9), яке входить до формули (1.20), також є трохи більшим за реальне номінальне значення потокозчеплення ротора АД. Це призводить до того, що розрахункове номінальне значення електромагнітного моменту може бути трохи більшим (на 5-10%) реального номінального значення електромагнітного моменту АД. Відповідно до теорії електричних машин номінальне значення електромагнітного моменту АД має бути більшим за номінальне значення механічного моменту АД. Тому отримані результати можна вважати вірними.

2.22 Визначаємо сумарний коефіцієнт розсіювання обмоток статора и ротора АД за формулою (1.23):

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} = 1 - k_1 k_2; \quad (1.23)$$

$$\sigma = 1 - \frac{0,0896^2}{0,0926 \cdot 0,0943} = 83,71 \times 10^{-3} \quad .$$

2.23 За формулою (1.24) визначаємо електромагнітну сталу часу фази обмотки статора АД:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}. \quad (1.24)$$

$$\tau_1 = \frac{0,0926}{0,805} = 0,1155$$

2.24 За формулою (1.24) визначаємо електромагнітну сталу часу фази обмотки ротора АД:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}. \quad (1.24)$$

$$\tau_2 = \frac{0,0943}{0,536} = 0,1759$$

Контрольні запитання до практичного заняття №1

1 Напишіть формулу для визначення номінального середньоквадратичного значення фазного струму статора АД.

2 Напишіть формулу для визначення номінального опору фази обмотки статора АД.

3 Напишіть формули для визначення повної індуктивності фази обмотки статора, повної індуктивності фази обмотки ротора та взаємної індуктивності обмотки статора і обмотки ротора АД.

4 Напишіть формулу для визначення середньоквадратичного значення синусоїдального струму намагнічування АД, який працює в режимі ідеального неробочого ходу.

5 Напишіть формулу для визначення проекції просторового вектора струму статора на вісь «у» системи координат «х-у» при роботі АД в номінальному режимі з номінальним значенням струму намагнічування АД.

6 Напишіть формулу для визначення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора при роботі АД при номінальному значенні струму намагнічування.

7 Напишіть формулу для визначення коефіцієнта, який враховує потік розсіювання обмотки ротора АД.

8 Напишіть формулу для визначення номінального значення електромагнітного моменту, який розвиває АД.

9 Напишіть формулу для визначення номінального значення механічного моменту, який розвиває АД.

10 Як визначити кількість пар полюсів обмотки статора АД на підставі позначення АД серії 4А.

3 Практичне заняття №2

«Функціональна схема системи регулювання швидкості валу АД при векторному керуванні струмом статора АД».

Мета заняття: вивчення функціональної схеми системи регулювання швидкості валу АД при векторному керуванні струмом статора асинхронного двигуна.

Функціональна схема системи регулювання швидкості електроприводу при векторному керуванні струмом статора асинхронного двигуна показана на рисунку 3.1. Живлення АД здійснюється від перетворювача частоти (ПЧ), до складу якого входить ланка постійного струму та автономний інвертор напруги (АІН). У показаному на рис. 2.1 варіанті схеми системи регулювання швидкості валу АД використовується контур регулювання просторового вектору струму статора з великою полосою пропускання частот (більшою за 1 кГц). На рисунку 2.1 контур регулювання просторового вектору струму статора представлено двома контурами регулювання двох проекцій просторового вектору струму статора на осі системи координат «х-у». Контури регулювання струму працюють за алгоритмом, який відображає електромагнітні процеси, що відбуваються в АД, в системі координат «х-у». Система координат «х-у» обертається з кутовою частотою ($\Omega_{\text{оел}}$) відносно системи координат « α - β », яка є нерухомою відносно статора АД. До складу контурів регулювання проекцій просторового вектора струму статора на осі «х» і «у» (i_{IX}) і (i_{IY}) системи координат «х-у» входять регулятори проекцій просторового вектора струму статора (РТх) та (РТу), перетворювачі координат прямого каналу (ПКП) і перетворювачі координат зворотного каналу (ПКО). Сигнал завдання проекції просторового вектора струму статора на ось «х» (i_{IX}^*) системи координат «х-у» формує функціональний перетворювач (ФП). Сигнал завдання проекції просторового вектора струму статора на ось «у» (i_{IY}^*) системи координат «х-у» формує регулятор швидкості (РШ).

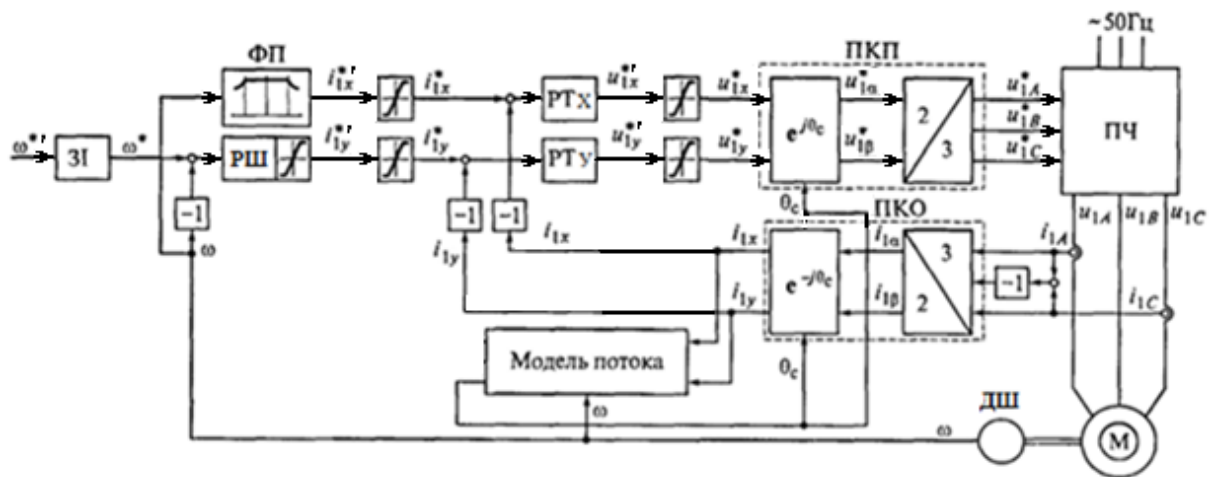


Рисунок 3.1. Функціональна схема системи регулювання швидкості валу АД при векторному керуванні струмом статора АД.

Контрольні запитання до практичного заняття №2

- 1 Яке призначення функціонального перетворювача (ФП)?
- 2 Яке призначення регулятора швидкості (РШ)?
- 3 Яке призначення регуляторів струму статора (РТх) та (РТу)?
- 4 Яке призначення перетворювачів (ПКП) і (ПКО)?
- 5 Напишіть рівняння за якими працює ПКП.
- 6 Напишіть рівняння за якими працює ПКО.
- 7 Поясніть роботу блоків обмеження сигналів завдання проекцій просторового вектору струму статора.
- 8 Поясніть роботу блоків обмеження сигналів завдання проекцій просторового вектору напруги на обмотці статора.
- 9 Яке призначення датчика (ДШ)?
- 10 Яке призначення блоку «Модель двигуна»?
- 11 Яке призначення блоку (ЗІ)?
- 12 Яке призначення перетворювача частоти (ПЧ)?

4 Практичне заняття №3

«Визначення параметрів структурної схеми системи регулювання струму статора АД».

Мета заняття: вивчення методики визначення параметрів структурної схеми системи регулювання струму статора АД.

4.1 На рисунку 4.1 показано функціональні схеми контурів регулювання проєкцій просторового вектора струму статора на осі системи координат "x-y".

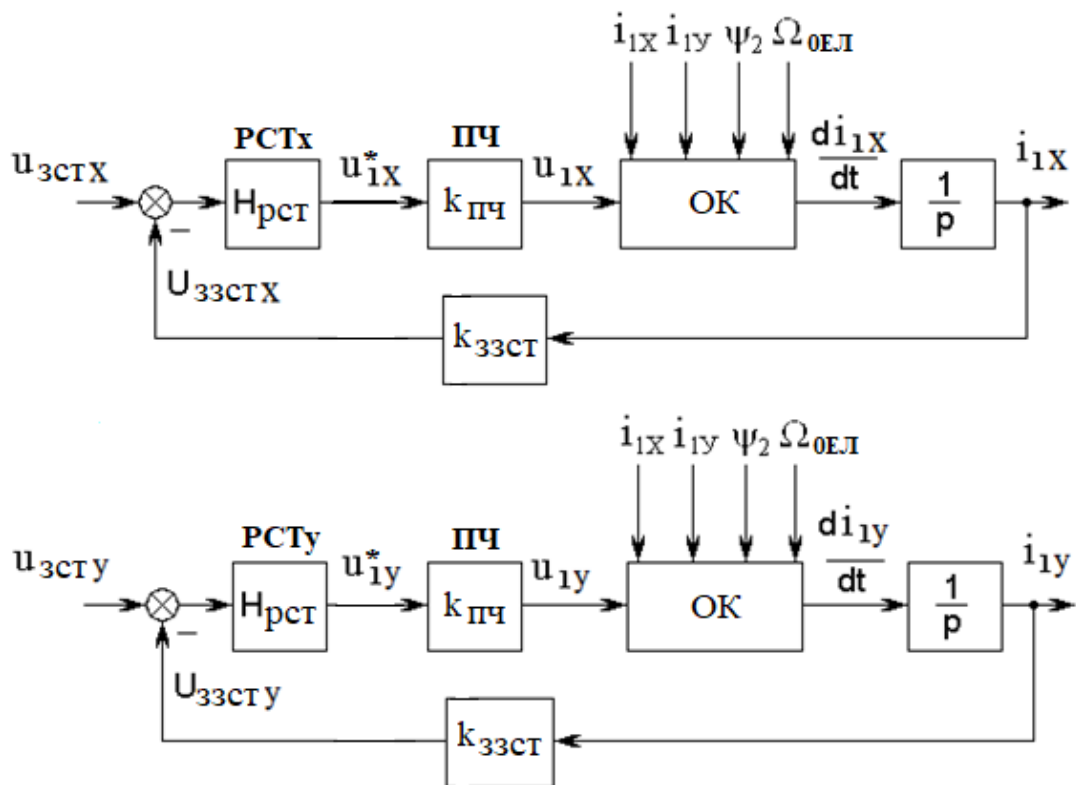


Рисунок 4.1. Функціональні схеми контурів регулювання проєкцій просторового вектора струму статора на осі системи координат "x-y".

4.2 Розрахуємо параметри ПИ-регулятора просторового вектору струму статора за формулами. Коефіцієнт підсилення регулятора струму визначаємо за формулою (4.1):

$$k_{\text{ет}} = \frac{(2\Omega_0 \sigma T_1 - 1) R_1}{k_{\text{пч}} k_{\text{з.ст}}} \quad (4.1)$$

де Ω_0 – середньо-геометричний корінь характеристичного полінома контуру регулювання просторового вектору струму статора, який визначає моторність контуру регулювання просторового вектору струму статора;

σ – сумарний коефіцієнт розсіювання обмоток статора и ротора АД;

T_1 – електромагнітна стала часу фази обмотки статора АД;

R_1 – активний опір фази обмотки статора АД;

$k_{\text{з.ст}}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом

$k_{\text{пч}}$ – коефіцієнту підсилення перетворювача частоти:

4.3 Як правило, значення середньо-геометричного кореня характеристичного полінома контуру регулювання просторового вектору струму статора вибирають за умовою:

$$5000 \text{ с} \leq 0.002 \text{ рад / с} \quad (4.2)$$

Тому на підставі умови (4.2) приймаємо значення середньо-геометричного кореня характеристичного полінома (Ω_0) для контуру регулювання просторового вектору струму статора:

$$\Omega_0 = 10000 \quad (4.3)$$

4.4 Постійну часу пропорційного інтегруючого регулятора струму визначаємо за формулою (4.4):

$$T_{\text{ет}} = \frac{k_{\text{пч}} k_{\text{з.ст}}}{\sigma R_1 T_1 \Omega_0^2} \quad (4.4)$$

4.5 Визначаємо коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом за формулою (4.5)

$$k_{\text{з.ст}} = \frac{U_{\text{з.ст.макс}}}{I_{\text{макс}}} \quad (4.5)$$

де $U_{\text{з.ст.макс}}$ – найбільше значення сигналу завдання струму статора;

$I_{1,MAX}$ – найбільше значення амплітуди просторового вектора струму статора АД, яке може забезпечити перетворювач частоти і яке може витримати АД.

4.6 Для прикладу будемо розглядати мікропроцесорну систему керування, в якій модуль максимального значення сигналу завдання не повинен перевищувати 1. Умовно будемо вважати, що відповідно до функціональної схеми системи регулювання швидкості валу АД, яку показано на рисунку 3.1, максимальне значення сигналу завдання амплітуди просторового вектору струму статора дорівнює 1 вольту (1В):

$$B_{3,CT,MAX} = 1 \quad (3.37)$$

4.7 В більшості сучасних перетворювачів частоти максимальне значення струму статора є обмеженим на рівні від $(1.5 \times I_{1,н})$ до $(2,1 \times I_{1,н})$, де $I_{1,н}$ – номінальне значення струму обмотки статора АД. Тому для прикладу будемо вважати, що найбільше значення струму статора в 2 рази перевищує номінальне значення струму статора АД. Тобто максимальне значення амплітуди просторового вектору струму статора треба визначати формулою (4.7):

$$I_{\Phi MAX} = 2I_{1,н.} = 2 (\sqrt{2} I_1) ; \quad (4.7)$$

$$I_{1,MAX} = 2 (\sqrt{2} \cdot 16.41) = 46,41$$

4.8 На підставі (4.6) і (4.7) за формулою (4.5) отримаємо значення коефіцієнту зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{3,3,CT} = \frac{B}{46,41} = 0,0215 \quad (4.8)$$

4.9 На підставі функціональної схеми контурів регулювання проекцій просторового вектора струму статора на осі системи координат "х-у", яку показано на рисунку 4.1, визначаємо коефіцієнт підсилення перетворювача частоти за формулою (4.9):

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{U_{1.\text{MAX}}}{U_{1.\text{MAX}}^*} = \frac{\sqrt{u_{1.X.\text{MAX}}^2 + u_{1.Y.\text{MAX}}^2}}{\sqrt{(u_{1.X.\text{MAX}}^*)^2 + (u_{1.Y.\text{MAX}}^*)^2}} \quad (4.9)$$

де $U_{1.\text{MAX}} = \sqrt{2} \cdot 220,0 \text{ В} = 311,13$ – максимальне значення амплітуди

просторового вектора напруги на обмотці статора, яке відповідає номінальному середньоквадратичному значенню фазної напруги 220В;

$U_{1.\text{MAX}}^* = 1 \text{ В}$ – максимальна амплітуда напруги сигналу керування

на виході регулятора струму, який надходить на вхід ПЧ:

$$U_{1.\text{MAX}}^* = \sqrt{(u_{1.X.\text{MAX}}^*)^2 + (u_{1.Y.\text{MAX}}^*)^2} = 1 \text{ В} \quad (4.10)$$

4.10 На підставі (4.9) отримаємо значення коефіцієнту підсилення перетворювача частоти:

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{311,13}{1} = 311,13 \quad (4.11)$$

Інші параметри були визначені в розділі 1.

4.11 За формулою (4.1) визначаємо коефіцієнт ПІ-регулятора струму ($k_{\text{РТ}}$):

$$k_{\text{РТ}} = \frac{(2 \cdot 10000 \cdot 0,08371 \cdot 0,1155 - 1) \cdot 0,805}{311,13 \cdot 0,0215} = 23,150$$

4.12 За формулою (4.4) визначаємо постійну часу ПІ-регулятора струму ($T_{\text{РТ}}$):

$$T_{\text{РТ}} = \frac{311,13 \cdot 0,0215}{0,08371 \cdot 0,805 \cdot 0,1155 \cdot 10000^2} = 8,595 \times 10^{-6} \text{ с}$$

Контрольні запитання до практичного заняття №3

1 Намалюйте функціональну схему контурів регулювання проекцій просторового вектора струму статора на осі системи координат "х-у".

2 Напишіть формули розрахунку параметрів ПИ-регулятора просторового вектору струму статора. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.

3 Напишіть формулу розрахунку коефіцієнту зворотного зв'язку за струмом. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.

4 Напишіть формулу розрахунку коефіцієнту підсилення перетворювача частоти. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.

5 Практичне заняття №4

«Визначення параметрів структурної схеми системи регулювання швидкості валу АД».

Мета заняття: вивчення методики визначення параметрів структурної схеми системи регулювання швидкості валу АД.

5.1 На підставі функціональної схеми системи регулювання швидкості валу АД при векторному керуванні струмом статора АД, яку показано на рисунку 2.1, накреслимо структурну схему системи (контуру) регулювання швидкості (СРШ) валу АД, яку показано на рисунку 5.1. Відповідно до структурної схеми СРШ визначаємо коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю за формулою (5.1):

$$k_{3.3.ш.} = \frac{U_{3.ш.МАХ}}{\omega_{МАХ}}. \quad (5.1)$$

де $U_{3.ш.МАХ}$ – найбільше значення сигналу завдання швидкості валу АД;

$\omega_{МАХ}$ – найбільше значення швидкості валу АД.

Обмежуємо найбільше значення сигналу завдання швидкості валу АД на рівні ± 1 В:

$$B_{3.ш.МАХ} = 1,0 \quad (5.2)$$

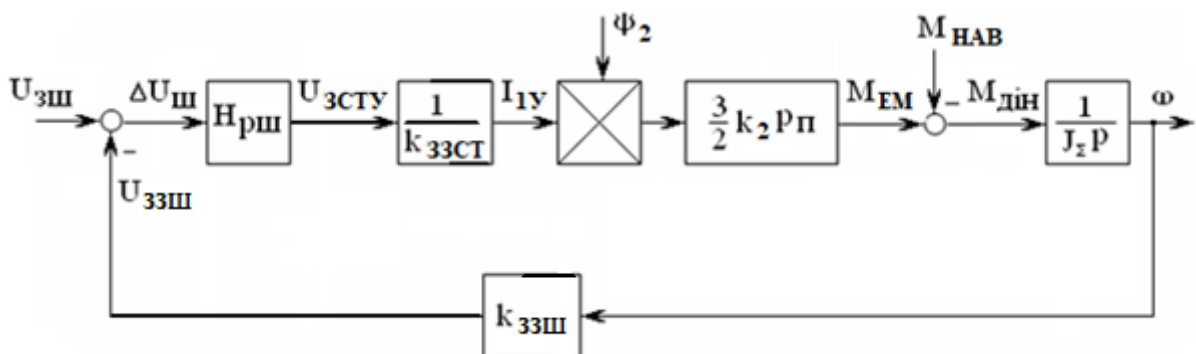


Рисунок 5.1 – Структурна схема контуру регулювання швидкості валу АД.

5.2 В більшості сучасних систем двозонного регулювання швидкості максимальне значення частоти напруги на обмотці статора АД перевищує номінальне значення частоти напруги на обмотці статора не більше ніж у три рази. Тому ми будемо розробляти систему двозонного регулювання швидкості валу АД, для якої максимальне значення частоти напруги на обмотці статора буде дорівнювати:

$$f_{\text{MAX.}} = 3f_{\text{H.}} \quad (5.3)$$

5.3 Максимальному значенню частоти напруги на обмотці статора АД відповідає максимальне значення синхронної кутової швидкості обертання валу АД, яке визначається формулою (5.4):

$$\omega_{\text{MAX}} = \frac{2\pi f_{\text{MAX.}}}{p_{\text{П}}}, \text{ rad / s.} \quad (5.4)$$

5.4 Діапазон регулювання кутової швидкості валу АД у другій зоні визначаємо за формулою (5.5):

$$D_2 = \frac{\omega_{\text{MAX}}}{\omega_{\text{H.}}} = \frac{\frac{2\pi f_{\text{MAX.}}}{p_{\text{П}}}}{\frac{2\pi f_{\text{H.}}}{p_{\text{П}}}} = \frac{f_{\text{MAX.}}}{f_{\text{H.}}} \quad (5.5)$$

5.5 На підставі рівнянь (5.5) і (5.3) отримаємо значення діапазону регулювання кутової швидкості валу АД у другій зоні для нашої системи двозонного регулювання швидкості валу АД:

$$D_2 = \frac{3f_{\text{H.}}}{f_{\text{H.}}} = 3. \quad (5.6)$$

Таким чином, в нашому електроприводі найбільше значення синхронної кутової швидкості обертання валу АД буде у 3 рази перевищувати значення швидкості ідеального холостого ходу АД при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора.

$$\omega_{\text{HMAX.}} = 3\omega_{\text{H.}} \quad (5.7)$$

5.6 Значення швидкості ідеального холостого ходу АД при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора беремо з пункту 1.17:

$$\omega_0 = \frac{104}{72} \quad (5.8)$$

За формулою (5.1) визначаємо коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_{\text{с.ш.}} = \frac{1,0}{3 \cdot 104,72} = 0,00318 \quad (5.9)$$

5.7 Відповідно до структурної схеми системи регулювання швидкості, яку показано на рисунку 5.1 визначаємо параметри регулятора швидкості.

Значення коефіцієнта підсилення пропорційного інтегруючого регулятора швидкості (ПІ-РШ) отримаємо за формулою (5.10):

$$K_{\text{Р.ш.}} = \frac{4\Omega_{\text{с.ст.}} k_{\text{с.ст.}} J_{\Sigma}}{3k_{\text{ш.}} k_{\text{ш.}}}. \quad (5.10)$$

Значення постійної часу пропорційного інтегруючого регулятора швидкості (ПІ-РШ) отримаємо за формулою (5.11)

$$T_{\text{Р.ш.}} = \frac{3k_{\text{ш.}} k_{\text{ш.}} k_{\text{ш.}}}{2\Omega_{\text{с.ст.}}^2 J_{\Sigma}}. \quad (5.11)$$

Значення середньо геометричного кореня характеристичного поліному оптимізованої замкнутої системи регулювання швидкості визначаємо за формулою (5.12):

$$\Omega_0 = \frac{\Omega_{\text{зр}}}{2} = \frac{2\pi f_{\text{П}}}{2}, \quad (5.12)$$

де $\Omega_{\text{зр}}$ – кругова частота зрізу оптимізованої замкнутої системи регулювання швидкості, яка має відповідати вимогам державного стандарту.

Кругову частоту зрізу оптимізованої замкнутої системи регулювання швидкості визначаємо за формулою (5.13):

$$\Omega_{3p} = 2\pi f_{\Pi}, \quad (5.13)$$

де f_{Π} – полоса пропускання частот оптимізованого контуру регулювання швидкості, яка має відповідати вимогам державного стандарту.

5.12 Для електроприводів, призначених для механізмів головного руху металообробних верстатів полоса пропускання частот контуру регулювання швидкості (f_{Π}) має бути не менше 20Гц.

$$f_{\Pi} = 20 \text{ Hz} \quad (5.14)$$

За формулою (5.12) отримаємо значення кореня характеристичного поліному оптимізованої замкнутої системи регулювання швидкості:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi \cdot 20}{2} = 62,832 \quad (5.15)$$

5.14 Будемо вважати, що момент інерції технологічного механізму, значення якого є приведеним до валу двигуна, дорівнює моменту інерції двигуна. На підставі цього можемо записати рівняння (5.16):

$$J_{\text{МЕХ}} = J_{\text{Д}}. \quad (5.16)$$

5.15 Тому сумарний момент інерції електроприводу визначаємо за формулою (5.17)

$$J_{\Sigma} = J_{\text{Д}} + J_{\text{МЕХ}} = 2J_{\text{Д}}. \quad (5.17)$$

На підставі паспортних параметрів АД і за формулою (5.17) визначаємо сумарний момент інерції електроприводу:

$$J_{\Sigma} = 2 \cdot 0,058 = 0,116 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (5.18)$$

5.16 Використовуючи розраховані значення параметрів, що входять до складу формули (5.10), визначимо коефіцієнт підсилення пропорційного інтегруючого регулятора швидкості (ПІ-РШ):

$$k_{\text{Р.ІІ.}} = \frac{4 \cdot 62,832 \cdot 0,0215 \cdot 0,116}{3 \cdot 0,950 \cdot 3 \cdot 0,958 \cdot 0,00318} = 24,06. \quad (5.19)$$

5.17 Використовуючи розраховані значення параметрів, що входять до складу формули (5.11), визначимо постійну часу пропорційного інтегруючого регулятора швидкості (ПІ-РШ):

$$T_{P.ш.} = \frac{3 \cdot 0,950 \cdot 3 \cdot 0,958 \cdot 0,00318}{2 \cdot 62,832^2 \cdot 0,0215 \cdot 0,116} = 0,001323 \quad (5.20)$$

5.18 Перемножимо рівняння (5.10) і (5.11). В результаті отримаємо рівняння (5.21):

$$T_{P.ш.} k_{P.ш.} = \frac{2}{\Omega_0}. \quad (5.21)$$

Рівняння (5.21) можна використовувати для перевірки правильності проведених розрахунків параметрів ПІ-РШ за формулами (5.10) і (5.11). Наприклад, після підстановки значень (5.19) і (5.20) до рівняння (5.21) отримаємо рівняння (5.22):

$$0,001323 \cdot 24,06 = \frac{2}{62,832},$$

$$0,031825 \text{ с} = 0,031831 \text{ с}. \quad (5.22)$$

Оскільки похибка між значеннями, розташованими в лівій і в правій частинах рівняння (5.22) вкрай мала, то можна вважати, що розрахунок параметрів ПІ-РШ виконано вірно за умовою, що до формул (5.10) и (5.11) підставленні вірні значення параметрів.

5.19 Мінімальне значення повного потокозчеплення обмотки ротора АД, яке буде мати місце при максимальній швидкості обертання валу АД, визначаємо за формулою (5.23)

$$\Psi_{\min} = \frac{\Psi_{\text{в}}}{D_2}, \quad (5.23)$$

де D_2 – діапазон регулювання швидкості в другій зоні, який визначається формулою (5.5).

За формулою (5.23) визначасмо мінімальне значення повного потокозчеплення обмотки ротора АД, яке буде мати місце при максимальній швидкості обертання валу АД:

$$\Psi_{\text{МІН}} = \frac{0,962}{3} = 0,321 \quad (5.24)$$

Розраховані значення параметрів ПІ-регулятора швидкості будемо використовувати при моделюванні замкнутої системи двозонного регулювання швидкості валу АД.

5.20 На підставі формули (2.25) визначимо мінімальне значення проекції струму статора на ось «х», яке відповідає мінімальному значенню повного потокозчеплення обмотки ротора $\Psi_{2\text{МІН}}$.

$$\Psi_{2\text{МІН}} = L_m i_{1\text{х.МІН}} \quad (2.25)$$

$$i_{1\text{х.МІН}} = \frac{\Psi_{2\text{МІН}}}{L_m}$$

$$i_{1\text{х.МІН}} = \frac{0,3193}{0,0896} = 3,564 \text{ А}$$

5.21 Напишемо рівняння яке визначає максимальне тривале значення моменту навантаження на валу АД при максимальному значенні частоти напруги на обмотці статора, тобто при номінальному значенні проекції струму статора на ось «у» дорівнює (20,6А) і при мінімальному значенні модуля просторового вектора повного потокозчеплення ротора ($\Psi_{2\text{МІН}}$). В результаті отримаємо формулу (5.25):

$$M_{\text{н. 2МІН}} = \frac{3}{2} k_p \quad ; \quad (5.25)$$

Після підстановки до формули (5.25) номінального значення проекції струму статора на ось «у» і мінімального значення модуля просторового вектора повного потокозчеплення ротора отримаємо максимальне тривале значення моменту навантаження на валу АД при максимальному значенні частоти напруги на обмотці статора:

$$M_{\Omega_{\text{М. ЕЛ.МАХ}}} = \frac{3}{2} \cdot 0,950 \cdot 3 \cdot 0,321 \cdot 20,6 = 28,12 \text{ Нм}$$

Контрольні запитання до практичного заняття №4

- 1 Намалюйте структурну схему системи (контуру) регулювання швидкості (СРШ) валу АД.
- 2 Напишіть формули розрахунку параметрів ПИ-регулятора швидкості валу АД. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 3 Напишіть формулу розрахунку коефіцієнту зворотного зв'язку за швидкістю валу АД. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 4 Напишіть формулу розрахунку значення середньо геометричного кореня характеристичного поліному оптимізованої замкнутої системи регулювання швидкості валу АД. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 5 Напишіть формулу для перевірки правильності проведених розрахунків параметрів ПИ-РШ. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 6 Напишіть формулу для визначення мінімальне значення повного потокозчеплення обмотки ротора АД, яке відповідає максимальній швидкості валу.

6 Практичне заняття №5

«Визначення залежності модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора від кутової частоти напруги на обмотці статора».

Мета заняття: вивчення методики визначення залежності модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора від кутової частоти напруги на обмотці статора.

6.1 Значення ЕРС, яку магнітний потік генерує в обмотці статора АД визначається формулою (6.1).

$$\tilde{E}_S = j\Omega_{0\text{ЕЛ}} k_2 \tilde{\Psi}_2 \quad (6.1)$$

6.2 Для обмеження модуля просторового вектора напруги на обмотці статора АД при перевищенні кутовою частотою номінального значення ($\Omega_{0\text{ЕЛ}} > \Omega_{0\text{ЕЛ.Н}}$) треба обмежити значення ЕРС, яку магнітний потік генерує в обмотці статора АД. З формули (6.1) видно, що для обмеження значення ЕРС, яку магнітний потік генерує в обмотці статора АД, на рівні номінального значення при значенні кутової частоти напруги на обмотці статора АД більшому за номінальне значення ($\Omega_{0\text{ЕЛ}} > \Omega_{0\text{ЕЛ.Н}}$) треба змінювати значення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора відповідно до формули (6.2):

$$|\tilde{\Psi}_2| = \frac{\Omega_{0\text{ЕЛ.Н}}}{\Omega_{0\text{ЕЛ}}} |\tilde{\Psi}_{2.\text{Н}}|. \quad (6.2)$$

В таблиці 6.1 наведено результати розрахунку за формулою (6.2) значення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора при перевищенні кутовою частотою напруги на обмотці статора номінального значення ($\Omega_{0\text{ЕЛ}} > \Omega_{0\text{ЕЛ.Н}}$).

Таблиця 6.1.

Значення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора при перевищенні кутовою частотою напруги на обмотці статора номінального значення ($\Omega_{\text{ОЕЛ}} > \Omega_{\text{ОЕЛ.Н}}$).

$\frac{1}{s}$	0	1,0	1,1	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\frac{1}{I}$	1,0	1,0	1/1,1	1/1,2	1/1,5	1/2,0	1/2,5	1/3,0	1/3,5	1/4,0
$\frac{1}{I}$	1,0	1,0	1/1,1	1/1,2	1/1,5	1/2,0	1/2,5	1/3,0	1/3,5	1/4,0

Контрольні запитання до практичного заняття №5

- 1 Для чого призначено функціональний перетворювач (ФП)?
- 2 Напишіть формулу для визначення ЕРС, яку магнітний потік генерує в обмотці статора АД. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 3 Напишіть формулу для визначення номінального значення ЕРС, яку номінальний магнітний потік генерує в обмотці статора АД при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора АД. Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 4 Напишіть формули для визначення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора при регулюванні швидкості валу АД в другій зоні ($\Omega_{\text{ОЕЛ}} > \Omega_{\text{ОЕЛ.Н}}$). Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 5 Напишіть формули для визначення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора при регулюванні швидкості валу АД в першій зоні ($\Omega_{\text{ОЕЛ}} < \Omega_{\text{ОЕЛ.Н}}$). Дайте пояснення щодо параметрів, які входять до неї.
- 6 Дайте пояснення щодо таблиці 6.1 і до параметрів, які входять до неї.

7 Практичне заняття №6

«Визначення модуля напруги на обмотці статора при максимальному значенні кутової частоти».

Мета заняття: вивчення методики визначення модуля напруги на обмотці статора при максимальному значенні кутової частоти, яке має забезпечити обертання валу АД з заданою максимальною кутовою швидкістю при заданому максимальному значенні струму в обмотці статора.

7.1 Необхідно визначити потрібне значення модуля напруги на обмотці статора при максимальному значенні кутової частоти і при максимальному значенні модуля просторового вектора струму статора, який має протікати в обмотці статора АД при максимальному значенні кутової частоти напруги на обмотці статора.

7.2 Для сталого режиму роботи АД напишемо рівняння електричної рівноваги для обмотки статора АД, використовуючи проекції просторових векторів напруги, струму статора і повного потокозчеплення обмотки ротора на осі системи координат «х-у». В результаті отримаємо два рівняння (7.1) і (7.2):

$$u_{1x} = R_1 i_{1x} - \Omega_{0\text{ЕЛ}} \sigma L_1 i_{1y} \quad (7.1)$$

$$u_{1y} = R_1 i_{1y} + \Omega_{0\text{ЕЛ}} \sigma L_1 i_{1x} + \Omega_{0\text{ЕЛ}} k_2 \Psi_2 \quad (7.2)$$

7.3 На підставі параметрів еквівалентної Т-подібної електричної схеми АД, на підставі максимального заданого значення кутової частоти напруги на обмотці статора ($\Omega_{0\text{ЕЛ}} = \Omega_{0\text{ЕЛ.МАХ}}$) і на підставі значення проекцій максимального заданого значення модуля просторового вектора струму в обмотці статора ($\tilde{I}_{1.\text{МАХ}}$), який має протікати в обмотці статора при максимальній кутовій частоті ($\Omega_{0\text{ЕЛ.МАХ}}$), а також на підставі мінімального значення модуля просторового вектора повного потокозчеплення обмотки

ротора ($\Psi_2 = \Psi_{2\text{МІН}}$), яке відповідає максимальному значенню кутової частоти ($\Omega_{0\text{ЕЛ.МАХ}}$), треба визначити модуль просторового вектора напруги на обмотці статора АД. Для цього скористаємося рівняннями (7.1) і (7.2). В результаті отримаємо рівняннями (7.3) і (7.4).

$$u_{1\text{X.МАХ}} = R_1 i_{1\text{X.МІН}} - \Omega_{0\text{ЕЛ.МАХ}} \sigma L_1 i_{1\text{Y.МАХ}}. \quad (7.3)$$

$$u_{1\text{Y.МАХ}} = R_1 i_{1\text{Y.МАХ}} + \Omega_{0\text{ЕЛ.МАХ}} \sigma L_1 i_{1\text{X.МІН}} + \Omega_{0\text{ЕЛ.МАХ}} k_2 \Psi_{2\text{МІН}}. \quad (7.4)$$

7.4 На підставі формули (7.5) визначимо максимальне значення проекції струму статора на ось «у», яке відповідає мініимальному значенню повного потокозчеплення обмотки ротора $\Psi_{2\text{МІН}}$ і максимальному значенню модуля просторового вектора струму, який протікає в обмотці статора АД:

$$i_{1\text{МАХ}} = \sqrt{I_{\text{МАХ}}^2 - i_{1\text{МІН}}^2}, \text{ А.} \quad (7.5)$$

$$i_{1\text{МАХ}} = \sqrt{(46,41)^2 - (3,564)^2} = 46,27 \text{ А.}$$

7.5 Значення проекцій просторового вектора напруги на осі системи координат «х-у» визначаємо за формулами (7.3) і (7.4). В результаті отримаємо:

$$u_{1\text{X.МАХ}} = 0,805 \cdot 3,564 - 3 \cdot 314,183,71 \times 10^{-3} \cdot 0,0926 \cdot 46,27 = 2,881 - 338,042$$

$$u_{1\text{Y.МАХ}} = 0,805 \cdot 46,27 + 3 \cdot 314,183,71 \times 10^{-3} \cdot 0,0926 \cdot 3,564 + 3 \cdot 314,1 \cdot 0,950 \cdot 0,$$

7.6 Знайдемо потрібне значення модуля просторового вектора напруги на обмотці статора на підставі рівняння (7.6):

$$|\tilde{U}_{1\text{.МАХ}}| = \sqrt{(u_{1\text{X.МАХ}})^2 + (u_{1\text{Y.МАХ}})^2}; \quad (7.6)$$

$$|\tilde{U}_{1\text{.МАХ}}| = \sqrt{(-335,161)^2 + (353,618)^2} = 487,215 \text{ В.}$$

Контрольні запитання до практичного заняття №6

- 1 Чому необхідно визначити потрібне значення модуля напруги на обмотці статора при максимальному значенні кутової частоти напруги на обмотці статора.?
- 2 Як буде працювати система векторного керування струмом статора АД при значенні модуля напруги на обмотці статора меншому за потрібне значення модуля напруги на обмотці статора при максимальному значенні кутової частоти напруги на обмотці статора.?
- 3 Напишіть рівняння електричної рівноваги для обмотки статора АД, використовуючи проекції просторових векторів напруги і струму статора, а також використовуючи проекції просторового вектора повного потокозчеплення обмотки ротора на осі системи координат «х-у».
- 4 Напишіть рівняння для визначення максимального значення проекції просторового вектора струму статора на ось «у», яке відповідає мінімальному значенню повного потокозчеплення обмотки ротора $\Psi_{2\text{мін}}$ і максимальному значенню модуля просторового вектора струму, який протікає в обмотці статора АД.
- 5 Напишіть рівняння для визначення модуля вектора напруги на обмотці статора, яке відповідає поточному значенню повного потокозчеплення обмотки ротора $\Psi_{2\text{мін}}$ і поточному значенню модуля просторового вектора струму, який протікає в обмотці статора АД, при будь-якому значенні кутової частоти напруги на обмотці статора АД.
- 6 Напишіть рівняння для визначення модуля вектора напруги на обмотці статора, яке відповідає мінімальному значенню повного потокозчеплення обмотки ротора $\Psi_{2\text{мін}}$ і максимальному значенню просторового вектора струму, який протікає в обмотці статора АД.

Графіки перехідних процесів швидкості обертання валу двигуна та електромагнітного моменту при малому значенні сигналу завдання швидкості $U_{3ш} = 0,01$ В наведено на рисунку 8.2. Графіки перехідних

процесів швидкості обертання валу двигуна та електромагнітного моменту при великому значенні сигналу завдання швидкості $U_{\text{зш}} = 1,0$ В наведено на рисунку 8.3.

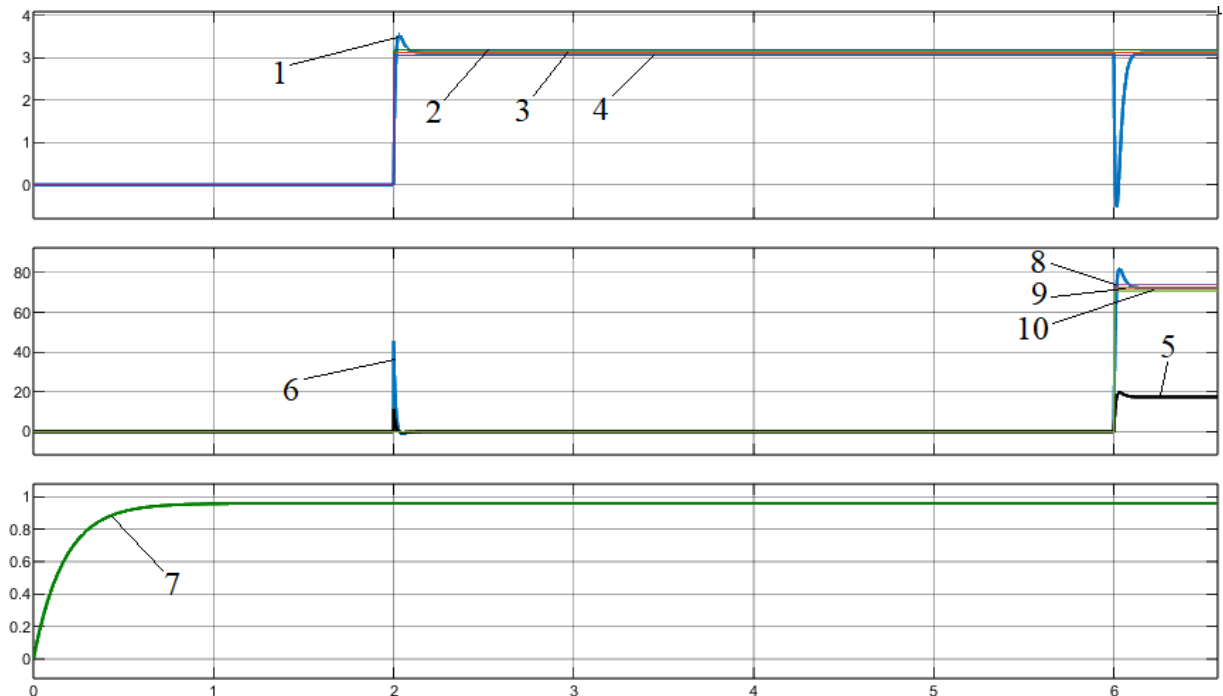


Рисунок 8.2. – Перехідні процеси в системі регулювання швидкості при $U_{\text{зш}} = 0,01$ В з затримкою сигналу завдання швидкості на 2 с

На рисунку 8.2 і на рисунку 8.3 графіки мають наступну нумерацію:

- 1 – дійсне значення кутової швидкості валу АД (блакитний графік);
- 2 – 1,02 заданого значення кутової швидкості (зелений графік);
- 3 – задане значення кутової швидкості (помаранчевий графік);
- 4 – 0,98 заданого значення кутової швидкості (фіолетовий графік);
- 5 – активна складова струму обмотки статора I_{s2} (чорний графік);
- 6 – електромагнітний момент, який розвиває АД (синій графік);
- 7 – потокозчеплення обмотки ротора (зелений графік);
- 8 – 1,02 значення прикладеного моменту (фіолетовий графік);
- 9 – момент навантаження, який прикладений до валу АД (помаранчевий графік);
- 10 – 0,98 значення прикладеного моменту (зелений графік).

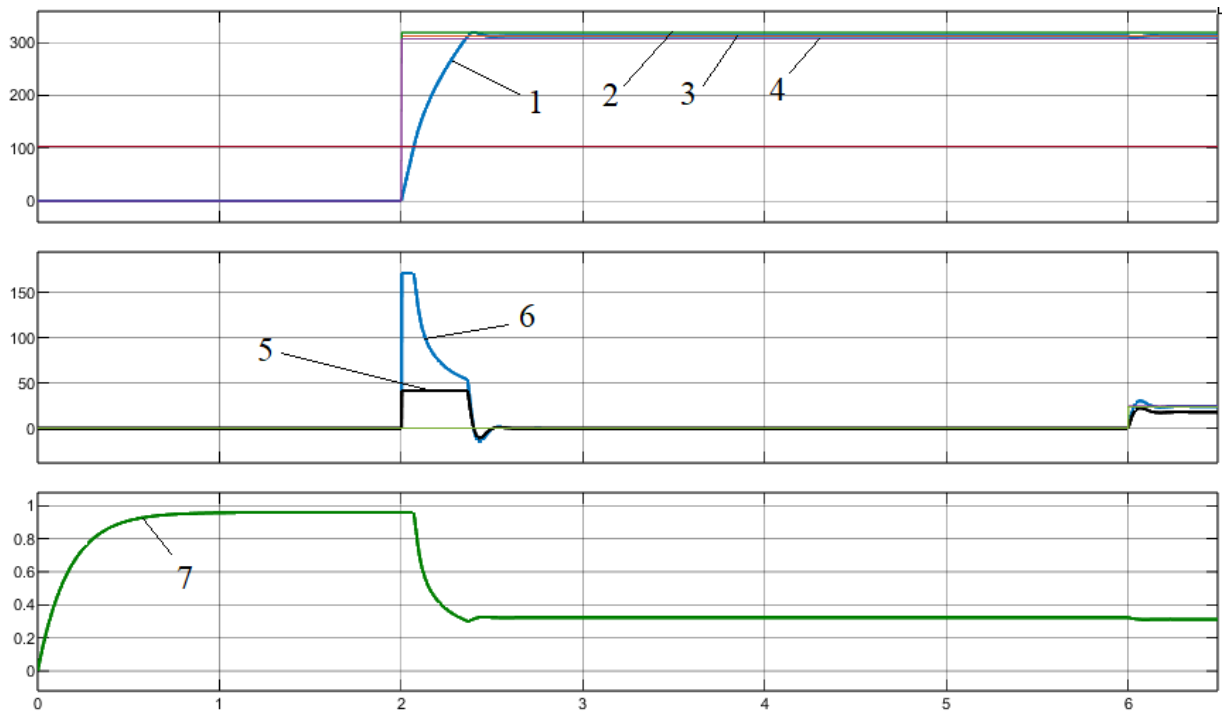


Рисунок 8.3 – Перехідні процеси в системі регулювання швидкості при $U_{зш} = 1,0$ В з затримкою сигналу завдання швидкості на 2 с.

8.3 Результати аналізу роботи системи двозонного регулювання швидкості валу АД з векторним керуванням струмом статора занесено до таблиці 8.1. Якість перехідних процесів в системі регулювання швидкості треба оцінювати на підставі значень відповідних параметрів. Наприклад, для оцінювання якості регулювання швидкості при зміні сигналу завдання швидкості ($U_{зш.}$) використовують наступні параметри.

8.4 Перегулювання за швидкістю ($\delta_{ш}$, %). Перегулювання за швидкістю визначається формулою (8.1):

$$\delta_{ш}, \% = \frac{\omega_{MAX} - \omega_{зш.}}{\omega_{зш.}} 100\%, \quad (8.1)$$

де ω_{MAX} – максимальне значення швидкості під час перехідного процесу після зміни сигналу завдання швидкості ($U_{зш.}$);

$\omega_{зш.}$ – задане значення швидкості.

Задане значення швидкості визначаємо за формулою (8.2):

$$\omega_{3.ш.} = \frac{U_{3.ш.}}{k_{3.3.ш.}}, \quad (8.2)$$

8.5 Час перехідного процесу по швидкості ($t_{п.п.}$, с). Відлік часу перехідного процесу по швидкості починається в мить, коли змінюється сигнал завдання швидкості ($U_{3.ш.}$) і закінчується в момент часу, коли поточне значення швидкості валу АД (ω) входить у трубку похибки $\pm 2\%$ від сталого значення швидкості. В даній системі регулювання швидкості стале значення швидкості дорівнює заданому значенню швидкості ($\omega_{3.ш.}$), яке визначається формулою (8.2).

Таблиця 8.1.

Результати моделювання системи двозонного регулювання швидкості.

Сигнали завдання швидкості $U_{3ш.}$, В		0,1	10
Перехідний процес по швидкості при зміні $U_{3ш.}$			
Швидкість	$\delta_{ш.}$, %	13,56	2,19
	$t_{п.п.}$, с	0,086	0,412
	$t_{перш.узг.}$, с	0,016	0,366
Перехідний процес по швидкості при зміні $M_{наб}$			
Швидкість	$M_{наб}$, Нм	72,29	72,29/3
	$\Delta\omega_{дин}$, рад/с	3,657	2,935
	$t_{п.п.}$, с	0,1115	-
	$t_{перш.узг.}$, с	0,27	0,108
Перехідний процес по моменту АД при зміні $M_{наб}$			
Момент АД	δ_m , %	13,57	25,35
	$t_{п.п.}$, с	0,086	0,2
	$t_{перш.узг.}$, с	0,01595	0,0328

8.6 Час першого узгодження швидкості зі сталим значенням швидкості ($t_{перш.узг.}$, с). В даній системі регулювання швидкості стале

значення швидкості дорівнює заданому значенню швидкості ($\omega_{3.ш.}$), яке визначається формулою (8.2). Відлік часу першого узгодження швидкості починається в мить зміни сигналу завдання швидкості ($U_{3.ш.}$) і закінчується в момент часу, коли поточне значення швидкості валу АД (ω) вперше досягає сталого значення швидкості ($\omega_{3.ш.}$).

8.7 В таблиці 8.1 використовуються наступні позначення параметрів, по значенню яких оцінюється якість перехідних процесів регулювання швидкості після зміни моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$).

8.8 Динамічна похибка регулювання швидкості при раптовому збільшенні моменту навантаження на валу АД ($\Delta\omega_{дин}$, рад/с) дорівнює максимальному зменшенню кутової швидкості валу АД при раптовому збільшенні моменту навантаження на валу АД від нуля до заданого значення ($M_{НАВ.}$). Динамічна похибка регулювання швидкості визначається формулою (8.3):

$$\Delta\omega_{дин} = \omega_{3.ш.} - \omega_{мин} \quad (8.3)$$

де $\omega_{мин}$ – мінімальне значення швидкості під час перехідного процесу після збільшення значення моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$);

$\omega_{3.ш.}$ – стале значення швидкості.

В даній системі регулювання швидкості стале значення швидкості дорівнює заданому значенню швидкості ($\omega_{3.ш.}$), яке визначається формулою (8.2).

8.9 Час перехідного процесу за швидкістю, який виникає після зміни моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$) ($t_{п.п.}$, с) дорівнює інтервалу часу, який починається в мить, коли змінюється момент навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$) і закінчується в момент часу, коли значення швидкості валу АД збільшується і відрізняється від сталого значення швидкості менше ніж на 2%. В даній системі регулювання швидкості стале значення швидкості

дорівнює заданому значенню швидкості ($\omega_{3.ш.}$), яке визначається формулою (8.2).

8.10 Час першого узгодження за швидкістю ($t_{перш.узг.}$, с) починається в мить, коли змінюється момент навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$) і закінчується в момент часу, коли значення швидкості валу АД вперше досягає сталого значення швидкості після початку перехідного процесу. В даній системі регулювання швидкості стале значення швидкості дорівнює заданому значенню швидкості ($\omega_{3.ш.}$), яке визначається формулою (8.2).

8.11 В таблиці 8.1 використовуються наступні позначення параметрів, по значенню яких оцінюється якість регулювання моменту, який розвиває АД ($M_{ЕМ.}$), при раптовій зміні моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$).

8.12 Перегулювання моменту, який розвиває АД (δ_M , %). Перегулювання моменту, який розвиває АД треба визначати за формулою (8.4):

$$\delta_M, \% = \frac{M_{ЕМ.МАХ} - M_{НАВ.}}{M_{НАВ.}} 100\%. \quad (8.4)$$

де $M_{ЕМ.МАХ}$ – максимальне значення моменту, який розвиває АД ($M_{ЕМ.}$), під час перехідного процесу при зміні моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$);

$M_{НАВ.}$ – стале значення моменту, який розвиває АД, яке має дорівнювати значенню моменту навантаження на валу АД.

8.13 Час перехідного процесу регулювання моменту, який розвиває АД ($t_{ПЛ.}$, с) при зміні моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$). Час перехідного процесу регулювання моменту починається в мить, коли змінюється момент навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$) і закінчується в момент часу, коли значення моменту ($M_{ЕМ.}$), який розвиває АД, відрізняється менше ніж на 2% від сталого значення моменту, який розвиває АД. Як правило, в системі регулювання швидкості стале значення

моменту, який розвиває АД, дорівнює моменту навантаження на валу АД ($M_{\text{НАВ.}}$).

8.14 Час першого узгодження моменту, який розвиває АД, ($t_{\text{ПЕРШ.УЗГ.}}$, с). Відлік часу першого узгодження починається в мить, коли змінюється момент навантаження на валу АД ($M_{\text{НАВ.}}$) і закінчується в момент часу, коли значення моменту ($M_{\text{ЕМ}}$), який розвиває АД, вперше досягає сталого значення моменту, який розвиває АД. Як правило, в системі регулювання швидкості стає значення моменту, який розвиває АД, дорівнює моменту навантаження на валу АД ($M_{\text{НАВ.}}$).

Контрольні запитання до практичного заняття №7

1 Чому необхідно отримати графіки перехідних процесів в СРШ при малому значенні сигналу завдання швидкості ($U_{\text{ЗШ}} = 0,01 \text{ В}$) і при великому значенні сигналу завдання швидкості ($U_{\text{ЗШ}} = 1,0 \text{ В}$).

2 Напишіть формулу для визначення перегулювання за швидкістю ($\delta_{\text{Ш}}$, %). Дайте пояснення.

3 Напишіть формулу для визначення динамічної похибки регулювання швидкості при раптовому збільшенні моменту навантаження на валу АД ($\Delta\omega_{\text{ДН}}$, рад/с). Дайте пояснення.

4 Напишіть формулу для визначення перегулювання моменту, який розвиває АД ($\delta_{\text{М}}$, %). Дайте пояснення.

5 Дайте пояснення щодо визначення часу перехідного процесу регулювання швидкості валу АД ($t_{\text{П.П.}}$, с).

6 Дайте пояснення щодо визначення часу першого узгодження для процесу регулювання швидкості ($t_{\text{ПЕРШ.УЗГ.}}$, с) валу АД.

7 Дайте пояснення щодо визначення часу перехідного процесу регулювання швидкості валу АД ($t_{п.п.}$, с), який виникає після зміни моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ}$).

8 Дайте пояснення щодо визначення часу першого узгодження ($t_{перш.узг.}$, с) для перехідного процесу регулювання швидкості валу АД, який виникає після зміни моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ}$).

9 Дайте пояснення щодо визначення часу перехідного процесу за моментом, який розвиває АД ($t_{п.п.}$, с) при зміні моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ}$).

10 Дайте пояснення щодо визначення часу першого узгодження моменту, який розвиває АД, ($t_{перш.узг.}$, с) після зміни моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ}$).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Векторне керування електродвигунами змінного струму. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для магістрів за фахом 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Авт. В.А. Войтенко. - Одеса: 2022. - 28 с.
2. С. М. Пересада, Є. О. Ніконенко, “Керування електроприводами – посібник”, КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2022, 396 с.
3. Жемеров Г. Г. Перетворення координат узагальнених векторів напруг і струмів трифазної системи електропостачання: білінгв. монографія / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 200 с. – Текст укр., англ. ISBN 978-966-695-510-7
4. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Київ, 2016. – С. 57-60.
5. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний та ін. – Кременчук, 2001. – 376 с.
6. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк, Д. Й. Родькін, Г.С. Чекавський. – Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2016. – 302 с. Іл.
7. Частото-керовані асинхронні та синхронні електроприводи: Навч.посібник / О.Г. Плахтина, С.С. Мазепа, А.С. Куцик.-Львів; Видавництво національного університету „Львівська політехніка”, 2002.-228с.
8. Tolochko O.I., Rozkaryaka P.I., Chekavskii G.S., Kuzhel A.K. Control of induction motor magnetization and demagnetization processes in fieldoriented control systems // Electromechanical and energy saving systems. Quarterly scientific and industrial journal. – Kremenichuk: KrNU. – 2011. – Vol. 3(15). – P. 79-82

Додаток А

Критерії оцінювання 7 поточних завдань за тематикою практичних занять

Максимальна оцінка за виконання кожного практичного завдання становить 5 балів.

Бали	Критерії оцінювання розв'язання практичних завдань
5	Завдання виконано в повному обсязі, застосовано вірний математичний апарат із вірною підстановкою чисел. Надано пояснення до процесу виконання завдання.
4	Завдання виконано в повному обсязі, застосовано вірний математичний апарат із вірною підстановкою чисел. Немає пояснення до процесу виконання завдання.
3	При виконанні завдання допущено одну або дві помилки під час виконання розрахунків, усі формули є вірними.
2	При виконанні завдання допущено 3 або 4 помилки під час виконання розрахунків, усі формули є вірними
1	При виконанні завдання допущено 5 або 6 помилок під час виконання розрахунків, усі формули є вірними
0	При виконанні завдання допущено більше 7 помилок під час виконання розрахунків, або завдання не виконано.