

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» (практичне заняття 1) для здобувачів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» другого (магістерського) рівня вищої освіти ОП «Електротехніка та електромеханіка» заочної форми здобуття освіти // Уклад. В.А. Войтенко. – Одеса: НУ «Одеська політехніка» 2025. - 16 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	$i_{\Pi}=I_{\text{СП}}/I_{\text{SH}}$	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	$\cos\varphi_H$	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 по відношенню до номінальної синхронної кутової швидкості обертання валу АД	$\omega_{\text{MAX}}/\omega_{0H}$	в. о.	3

Графіки перехідних процесів швидкості обертання валу двигуна та електромагнітного моменту при малому значенні сигналу завдання швидкості $U_{3ш} = 0,01$ В наведено на рисунку 2.2. 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 2.3.

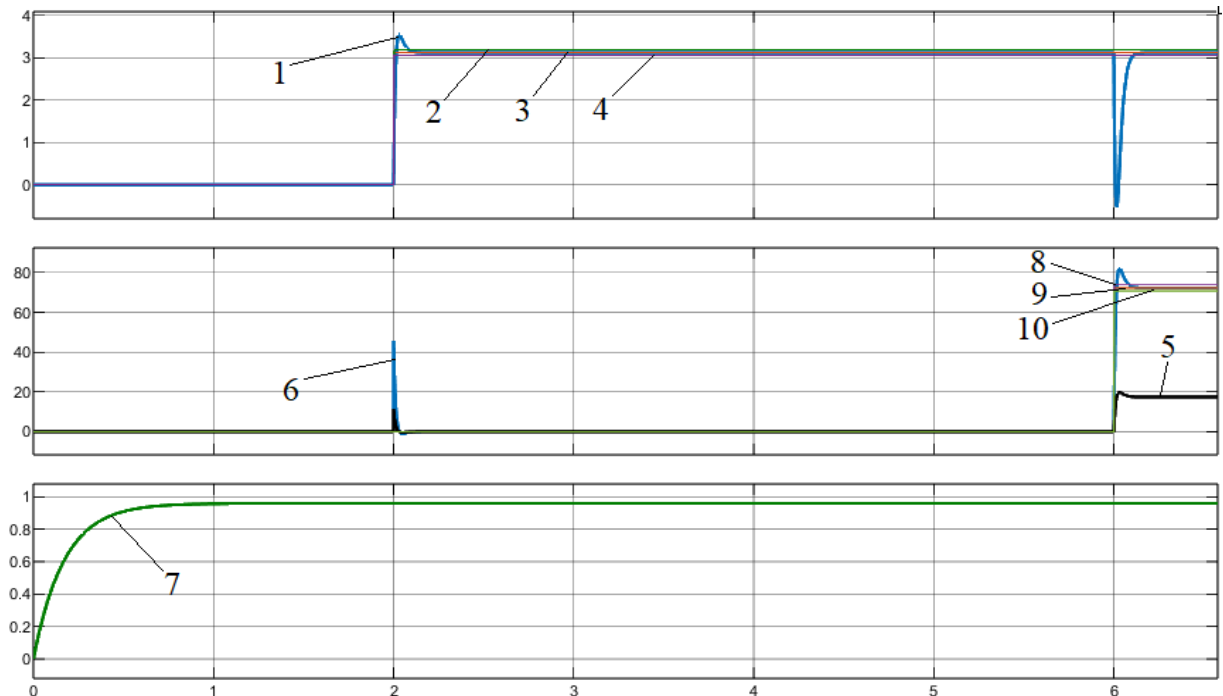


Рисунок 2.2. – Перехідні процеси в системі регулювання швидкості при $U_{\text{зш}} = 0,01$ В з затримкою сигналу завдання швидкості на 2 с

На рисунку 2.2 і на рисунку 2.3 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).

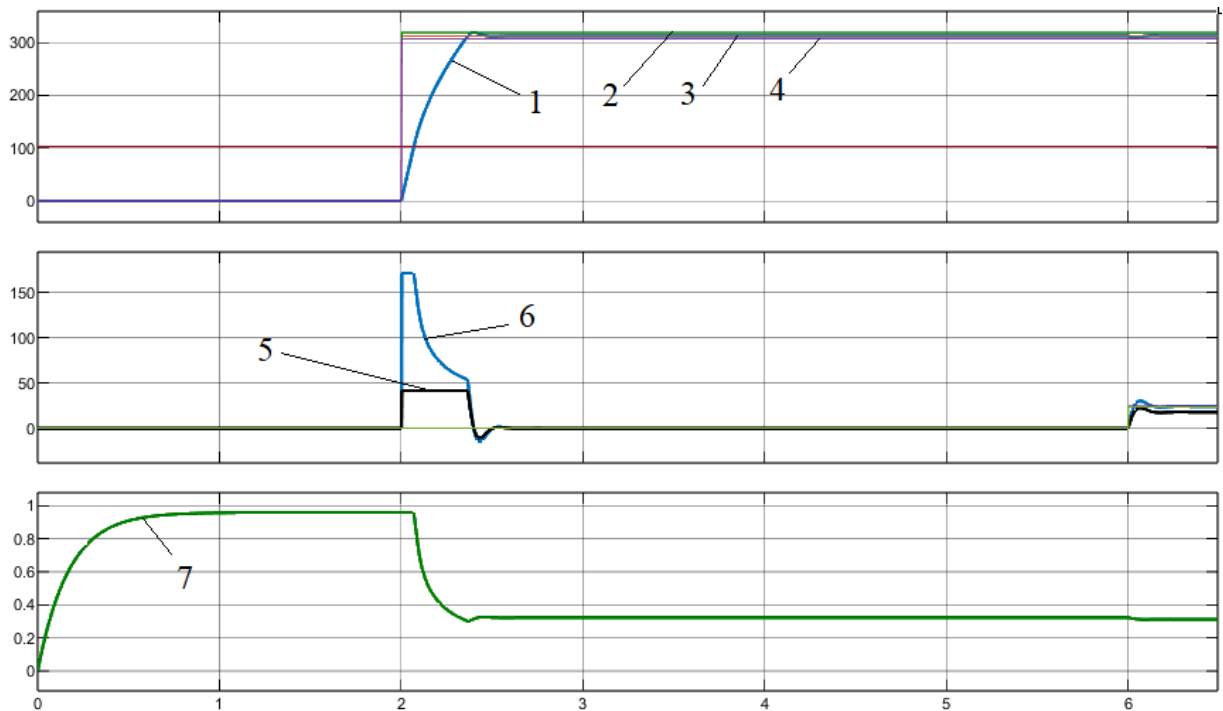


Рисунок 2.3 – Перехідні процеси в системі регулювання швидкості при $U_{зш} = 1,0$ В з затримкою сигналу завдання швидкості на 2 с.

2.3 Результати аналізу роботи системи двозонного регулювання швидкості валу АД з векторним керуванням струмом статора занесено до таблиці 2.1. 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.

2.4 Перегулювання за швидкістю ($\delta_{ш}$, %). Перегулювання за швидкістю визначається формулою (2.1):

$$\delta_{ш}, \% = \frac{\omega_{MAX} - \omega_{зш.}}{\omega_{зш.}} 100\%, \quad (2.1)$$

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 (2.2):

$$\omega_{3.ш.} = \frac{U_{3.ш.}}{k_{3.3.ш.}}, \quad (2.2)$$

2.5 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 (2.2).

Таблиця 2.1.

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

2.6 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 (2.2). 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 ($\omega_{3.ш.}$).

2.7 В таблиці 2.1 використовуються наступні позначення параметрів, по значенню яких оцінюється якість перехідних процесів регулювання швидкості після зміни моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$).

2.8 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 (2.3):

$$\Delta\omega_{дин} = \omega_{3.ш.} - \omega_{мин} \quad (2.3)$$

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 (2.2).

2.9 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 (2.2).

2.10 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 (2.2).

2.11 В таблиці 2.1 використовуються наступні позначення параметрів, по значенню яких оцінюється якість регулювання моменту, який розвиває АД ($M_{ЕМ.}$), при раптовій зміні моменту навантаження на валу АД ($M_{НАВ.}$).

2.12 Перегулювання моменту, який розвиває АД (δ_M , %). Перегулювання моменту, який розвиває АД треба визначати за формулою (2.4):

$$\delta_M, \% = \frac{M_{ЕМ.МАХ} - M_{НАВ.}}{M_{НАВ.}} 100\%. \quad (2.4)$$

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.

2.13 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 ($M_{\text{НАВ.}}$).

2.14 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 №1

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

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

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

4 Напишіть формулу для визначення перегулювання моменту, який розвиває АД (δ_m , %). Дайте пояснення.

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

6 Дайте пояснення щодо визначення часу першого узгодження для процесу регулювання швидкості ($t_{перш.узг.}$, 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 ($M_{наб}$).

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 ($M_{наб}$).

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

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

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. – Kremenchuk: KrNU. – 2011. – Vol. 3(15). – P. 79-82

Додаток А

Критерії оцінювання виконання практичного завдання за тематикою практичних занять

Максимальна оцінка за виконання практичного завдання становить 20 балів.

Бали	Критерії оцінювання розв'язання практичних завдань
20	Завдання виконано в повному обсязі, застосовано вірний математичний апарат із вірною підстановкою чисел. Надано пояснення до процесу виконання завдання.
19-16	Завдання виконано в повному обсязі, застосовано вірний математичний апарат із вірною підстановкою чисел. Немає пояснення до процесу виконання завдання.
15-12	При виконанні завдання допущено одну або дві помилки під час виконання розрахунків, усі формули є вірними.
11-8	При виконанні завдання допущено 3 або 4 помилки під час виконання розрахунків, усі формули є вірними
7-3	При виконанні завдання допущено 5 або 6 помилок під час виконання розрахунків, усі формули є вірними
2-0	При виконанні завдання допущено більше 7 помилок під час виконання розрахунків, або завдання не виконано.