

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проектування

з дисципліни

«Автоматизований електропривод»

для студентів спеціальності G3

«Електрична інженерія»

освітня програма «Електропривод та системи керування»
всіх форм навчання

Методичні вказівки до практичних занять та курсового проектування з дисципліни «Автоматизований електропривод» для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітня програма «Електропривод та системи керування» всіх форм навчання / Укл.: Крисан Ю.О., Васильєва Є.В. – Запоріжжя. НУ «Запорізька політехніка», 2026. - 51с.

Укладачі:

Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.;
Є.В. Васильєва, ст. викладач

Рецензент:

В.В. Зіновкін, проф., д.т.н

Відповідальний
за випуск:

А.В. Пирожок, доц., к.т.н

Затверджено
на засіданні кафедри
Електропривода і автоматизації
промислових установок
протокол № 5 від 04.02.2026 р.

Затверджено
на засіданні НМК ЕТФ
протокол № 7 від 19.02.2026 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Механіка електропривода, розрахунок електромеханічних і механічних характеристик.....	6
1.1 Вихідні дані.....	6
1.2 Завдання.....	13
1.3 Методичні вказівки.....	20
2 Розрахунок діаграми навантаження і вибір потужності двигуна за нагрівом	27
2.1 Вихідні дані.....	27
2.2 Завдання.....	27
2.3 Методичні вказівки.....	31
3 Моделювання роботи електропривода в середовищі MatLab.....	35
3.1 Моделювання природних і штучних характеристик ДПС НЗ в середовищі MatLab.....	35
3.2 Моделювання природних і штучних механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним і короткозамкненим ротором в середовищі MatLab	42
Перелік джерел посилання.....	51

ВСТУП

Мета і задачі практичних занять та курсового проектування

Мета практичних занять та курсового проектування – закріпити та практично засвоїти конкретні задачі розрахунку та проектування електроприводу за заданими технічними умовами. Для забезпечення поставленої задачі студенти спеціальності 141 на практичних заняттях та у процесі курсового проектування послідовно виконують чотири завдання, подані у цих методичних вказівках наступними розділами:

- механіка електропривода, розрахунок електромеханічних та механічних характеристик;
- розрахунок діаграм навантаження та вибір потужності двигуна за нагрівом;
- розрахунок та побудова статичних характеристик тиристорного електроприводу (ТП - Д);
- моделювання природних і штучних механічних характеристик двигуна в середовищі MatLab.

Обсяг та зміст курсового проекту

Обсяг пояснювальної записки (ПЗ) – 40-45 сторінок рукописного тексту. Обсяг графічного матеріалу – 2 листа формату А1. Конкретний зміст ПЗ разом з завданням на курсове проектування (КП), зміст графічної частини проекту розібрані далі у тематичних розділах.

Організація та керівництво курсовим проектуванням

Завдання на КП видає викладач, який веде практичні заняття та КП. Усього на КП у семестрі відведено 14 тижнів. Приблизні строки виконання окремих розділів проекту:

- знайомство з вимогами тематичних розділів, правилами оформлення ПЗ та графічної частини, видача завдань - на першому тижні;
 - виконання розділів: 1- 1-3 тиждень, 2- 4-6, 3- 7-10, 4- 11-12.
- Здача записки на перевірку - 12 тиждень. Захист КП - 13-14 тиждень.

КП студент виконує самостійно в години, відведені за розкладом для практичних занять та КП. Студент повинен звітувати про виконану роботу перед викладачем, який робить відмітки у графіку виконання КП та призначає після перевірки ПЗ конкретну дату захисту проекту. При виставленні оцінки особливу увагу звертають на обґрунтування рішень, на те, наскільки вірно уявлення студента про фізичні

процеси, що протікають в електроприводі в різних режимах роботи, на аспекти обчислення та оформлення звіту.

Вказівки по оформленню КП

Вказівки по оформленні ПЗ у повному обсязі містяться в стандарті підприємства СТП 15-96. Пояснювальна записка до курсових і дипломних проектів. Вимоги і правила оформлювання. Головні вимоги по оформленню ПЗ:

- ПЗ слід виконувати на листах паперу формату А4 (210х297), але можливе використання листів не менше 200х290;

- з усіх боків листа необхідно залишати поля (розмір лівого поля – 20 мм, правого – не менше 10, верхнього – 20, нижнього – 20 мм);

- обкладинку ПЗ слід виконувати з цупкого білого паперу (це титульний лист ПЗ та одночасно її перша сторінка) допускається виконувати титульний лист машинописним способом;

- нумерація сторінок ПЗ – наскрізна, номер сторінки ставлять арабськими цифрами у правому верхньому куту (на титульному листу номер сторінки не ставлять);

- графіки необхідно виконувати на окремих листах міліметрового паперу формату А4 або А2 (420х297) їх нумерація – наскрізна; розміщувати графіки треба одразу після посилання в тексті ПЗ;

- цифровий матеріал (результати обчислень) слід оформляти у вигляді таблиць. Таблиці нумерують у межах розділу, наприклад: «таблиця 4.3» - третя таблиця четвертого розділу. У тексті ПЗ таблиці слід розміщувати після першого посилання на неї. При перенесенні таблиці на наступну сторінку над нею розміщують слова: «продовження таблиці ...» з наведеним номером;

- ПЗ повинна мати: титульний лист, реферат, зміст, вступ, головну частину, висновок, перелік посилань;

- В ПЗ слід спочатку писати формули в загальному вигляді, потім підставляти числові значення величин у тій самій послідовності, що і в формулі. Потім навести остаточний результат, одиниці виміру.

1 МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА, РОЗРАУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1 Вихідні дані

1.1.1 Механізм, для якого розраховується розімкнута система електропривода, прийнято похилий підйомник з противагою (рисунок 1.1 а,б), що працює в чотирьох основних режимах: підйом та спуск відповідно навантаженого та порожнього візка.

Вага порожнього візка	m_0 , кг	1000
Вага противаги	m_{II} , кг	2000
Вага вантажу	m_H , кг	таблиця 1.1
Діаметр барабану	D_6 , м	0,8
Діаметр колеса візка	D_K , м	0,2
Діаметр цапф	d_{II} , м	0,04
Коефіцієнт тертя качання колеса о рейку	f , в.о.	0,005
Коефіцієнт тертя у цапфах	μ , в.о.	0,1
Коефіцієнт тертя реборд о рейки	k , в.о.	1,3
ККД барабану	η_6 , в.о.	0,9
ККД редуктора	η_p , в.о.	0,92
Момент інерції барабану	J_6 , кгм ²	70
Момент інерції ротора двигуна	J_d , кгм ²	Таблиця 1.2, 1.3
Момент інерції гальмівного шківa	J_T , кгм ²	0,2J _d
Момент інерції редуктора	J_p , кгм ²	0,1J _d
Кут нахилу шляху	α , гр.	Таблиця 1.1
Передаточне число редуктора	i	Таблиця 1.1
Номинальна швидкість візка	V_H , м/с	Таблиця 1.1

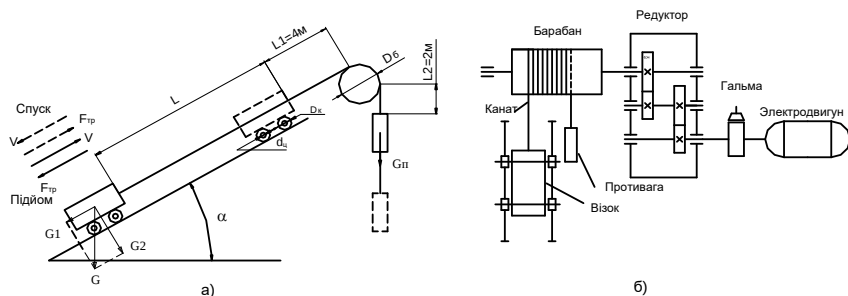


Рисунок 1.1 – Кінематична схема похилого підйомника

Таблиця 1.1 – Вхідні данні по варіантам

Номер варіанту	M_n , кг	Кут нахилу α , град	i_p	Номінальна швидкість V_n , м/с
1	4800	30	50	0,6
2	2800	45	70	0,55
3	3700	45	60	0,8
4	3300	30	60	0,65
5	4100	45	35	0,8
6	3500	45	55	0,7
7	4000	30	35	1,3
8	3900	45	45	0,9
9	4800	45	45	0,6
10	4300	30	60	0,5
11	3800	60	40	1,1
12	3600	45	40	0,75
13	6000	45	50	0,6
14	5400	45	50	0,6
15	4400	60	40	1,0
16	4600	60	45	0,7
17	3000	45	40	0,8
18	2500	45	55	0,7
19	3400	45	50	1,0
20	4700	30	55	0,7
21	5500	30	40	0,7
22	3100	60	50	0,6
23	4500	45	65	0,7
24	5100	30	35	1,0
25	1520	45	35	0,75

Продовження таблиці 1.1

Номер варіанту	M_n , кг	Кут нахилу α , град	i_p	Номінальна швидкість V_n , м/с
26	4700	30	50	0,55
27	2700	45	70	0,5
28	3600	45	60	0,75
29	3200	30	60	0,6
30	4000	45	35	0,75
31	3400	45	55	0,65
32	3900	30	35	1,25
33	3800	45	45	0,85
34	4700	45	45	0,55
35	4200	30	60	0,45
36	3700	60	40	1,05
37	3500	45	40	0,7
38	5900	45	50	0,55
39	5300	45	50	0,55
40	4200	60	40	0,95
41	4500	60	45	0,65
42	2900	45	40	0,75
43	2400	45	55	0,65
44	3300	45	50	0,99
45	4600	30	55	0,65
46	5400	30	40	0,65
47	3000	60	50	0,55
48	4400	45	65	0,65
49	5000	30	35	0,95
50	5100	45	35	0,7

Таблиця 1.2 – Каталогні данні електродвигунів постійного струму

Виконання	Тип двигуна	Дані при тривалостях вмикання (ТВ), %						Момент інерції якоря J _д , кгм ²	Кількість активних провідників якоря N	Опір обмоток , Ом			
		60			100					R _я	R _{дп}	R _c	R _{о3}
		P, кВт	I, А	n, об/хв	P, кВт	I, А	n, об/хв.						
Тихохідне	Д32	7,5	39	790	4	22	810	0,425	558	0,2	0,8	0,0086	94
	Д41	9,5	50	720	5,5	30	740	0,8	492	0,44	0,05	0,0037	70
	Д806	12	62	705	6,5	32	710	1	372	0,0625	0,041	0,0046	65
	Д808	17	85	625	9,5	50	635	2	278	0,034	0,02	0,0037	44,4
Швидкісне	Д32	10	52	1200	5,5	30	1240	0,45	372	0,085	0,036	0,0086	94
	Д41	13	68	1130	7	40	1150	0,8	310	0,047	0,025	0,0037	70
	Д806	15	80	1050	8,5	47	1150	1	426	0,031	0,016	0,0046	65
	Д808	19	96	815	10	57	825	2	210	0,0185	0,011	0,0037	44,4

Примітка. Для усіх двигунів $2p=4$, $2a=2$, $U_n=220В$, опори наведені для $t=20^{\circ}C$.

Таблиця 1.3 – Каталогні данні електродвигунів постійного струму

Виконання	Тип двигуна	Номінальні дані при режимі 60 хвилин				Номінальні дані при тривалостях ввімкнення (ТВ), %											
						15				25				40			
		Р _н , кВт	I _н , А	n, об/хв	М _{доп} , Нм	Р, кВт	I, А	n, об/хв	Р, кВт	I, А	n, об/хв	Р, кВт	I, А	n, об/хв	М _{доп} , Нм		
Тихохідне	Д32	12	65	740	466	14,5	82	740	12	65	720	9,5	51	770	373		
	Д41	16	98	670	686	19	105	680	16	85	660	13	70	700	549		
	Д806	22	116	635	981	24,5	130	680	20	104	695	16	84	700	765		
	Д808	37	192	565	1860	37	190	605	30	150	610	22	112	620	1450		
Швидкісне	Д32	18	94	1140	451	20	106	1180	16	84	1130	13	68	1190	363		
	Д41	24	124	1060	648	27	140	1090	22	114	1060	17,5	91	1120	520		
	Д806	32	165	980	930	33	170	1050	27,5	140	1050	21	110	1050	726		
	Д808	47	238	770	1715	43	220	790	35	175	800	26	134	810	1325		

Таблиця 1.4– Каталогні данні асинхронних двигунів

Тип двигуна	Ном. струм ротора при ТВ=40% I _{2н} , А	Ном. напруга ротора (лінійна) U _{2н} , В	Максимальний момент двигуна M _{МАХ} , Нм	Момент інерції якоря J _Д , кгм ²	Опір обмоток, Ом				Квадрат коеф. зведення опорів ротору K _е ²
					статора		Ротора		
					R ₁	X ₁	R ₂	X ₂	
МТН 311-6	42	172	314	0,225	0,51	0,645	0,124	0,241	4,2
МТН 312-6	46	219	471	0,312	0,337	0,431	0,125	0,254	2,66
МТН 411-6	60	235	638	0,5	0,219	0,271	0,08	0,233	2,37
МТН 412-6	73	255	932	0,675	0,133	0,197	0,059	0,173	1,96
МТН 312-8	43	165	422	0,312	0,51	0,666	0,132	0,29	3,5
МТН 411-8	48,8	206	569	0,573	0,352	0,507	0,125	0,245	2,96
МТН 412-8	57	248	883	0,75	0,202	0,313	0,102	0,231	2,03
МТН 511-8	64	281	1000	1,075	0,164	0,232	0,124	0,448	1,65

Примітка. Опір R_1 та R_2 для $t=75^{\circ}C$.

Таблиця 1.5– Каталогні данні асинхронних двигунів

Тип двигуна		Номінальні дані при ре- жимі $T_{Bн}=40\%$				Дані при тривалостях ввімкнення (ТВ), %									
						25			60			100			
						$P_{н},$ кВт	$I_{н},$ А	$n,$ об/хв	$\omega,$ рад/с	$P,$ кВт	I, A	$n,$ об/хв	$P,$ кВт	I, A	$n,$ об/хв
МТН 311-6		11	31,5	940	98,5	13	35	925	9	28,5	955	7	26,5	965	
МТН 312-6		15	38,5	950	99,5	17,5	43	945	12	34,5	960	9	31,5	965	
МТН 411-6		22	55,5	960	100	27	65	950	18	50	965	14	46	975	
МТН 412-6		30	76	965	101	36	87	955	25	69,5	970	18	60,5	980	
МТН 312-8		11	31	700	73,4	13	34,7	690	8,2	27,5	715	6	25	725	
МТН 411-8		15	43	705	74	18	48	695	13	39,8	710	10	35,6	720	
МТН 412-8		22	66	715	75	26	72	710	18	61	725	13	55	730	
МТН 511-8		28	71	705	74	34	82	695	23	63	715	18	57	725	

Примітка. Струс статора наведено при лінійній напрузі 380В. Остання цифра в позначенні двигуна вказує число полюсів машини 2р.

1.2 Завдання

1.2.1 Визначити статичні зусилля на ободі барабана в усіх чотирьох режимах підйомника, нехтуючи масою каната.

1.2.2 Визначити моменти на валу барабана і статичні моменти, зведені до валу двигуна для чотирьох режимів, а також потужності на валу двигуна, вважаючи, що швидкість підйому і спуску навантаженого і порожнього візка незмінні і рівні номінальній.

1.2.3 Визначити зведені до валу двигуна моменти інерції підйомної лебідки (що складається з двигуна, гальмів, редуктора і барабана), візка (з вантажем і без) і противаги для режимів пуску і гальмування. Знайти сумарний момент інерції усієї системи електропривода.

1.2.4 Визначити зведену до валу двигуна жорсткість гілки канату візка для її нижнього положення (рис. 1.1а). Скласти схему розрахунку пружного механічного середовища (рис. 1.2), вважаючи, що жорсткість валів двигуна редуктора, барабана і короткої гілки противаги дорівнюють нескінченності відносно до жорсткості довгої гілки канату візка. Скласти структурну схему (рис. 1.3) і передатну функцію за керуючою дією для пружного механічного середовища. Визначити дані по канату з таблиці 1.6.

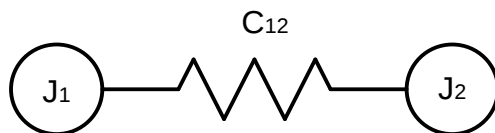


Рисунок 1.2 - Схема пружного механічного середовища

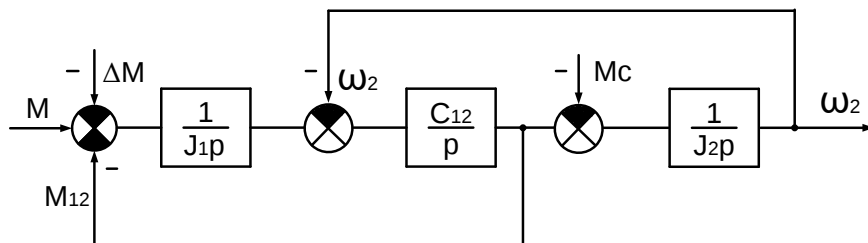


Рисунок 1.3 - Структурна схема

Таблиця 1.6 - Вихідні дані по варіантам

Номер варіанта	Канат	
	Діаметр, мм	Сумарна площа перетину, мм ²
1,2,4,7,8,12,17,18,19,20,24	17	108,3
3,5,6,9,10,11,21,22,23	20	151,3
13,14,15,16,25	22	175,5

1.2.5 Для попередньо обраного двигуна підйомної лебідки (табл. 1.2 -1.5) розрахувати і побудувати природну і штучну характеристику $\omega=f(M)$, і $\omega=f(I)$ в абсолютних і відносних одиницях (рис. 1.4, 1.5). Штучні характеристики побудувати для реостатного способу зміни швидкості двигуна за умов, що при $I=I_N$ ($M=M_N$) швидкість двигуна $\omega=0,5\omega_N$. Визначити додатковий опір R_d .

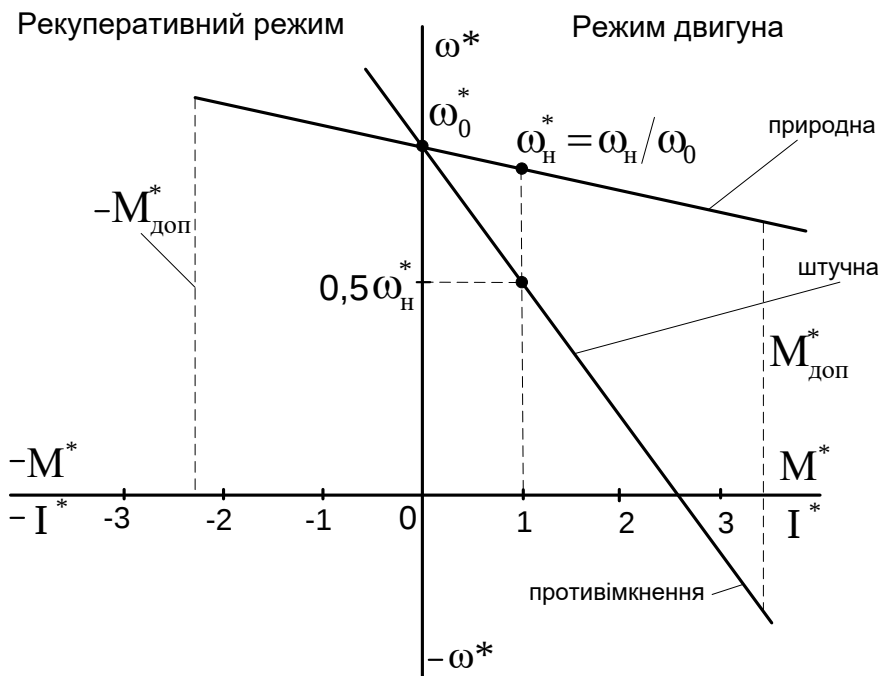


Рисунок 1.4 – Характеристики електродвигуна у відносних одиницях

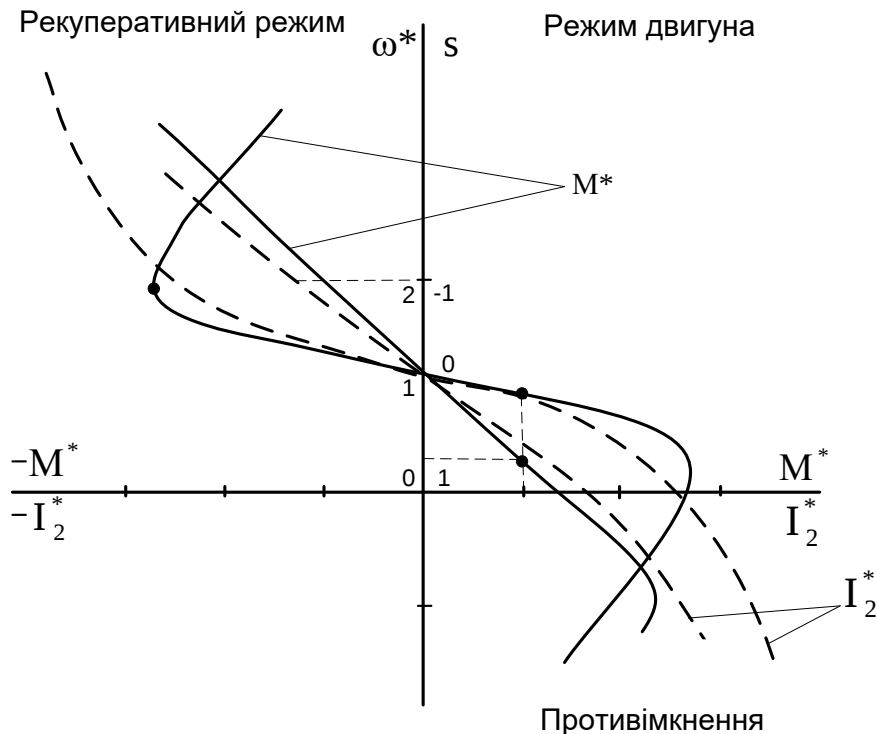


Рисунок 1.5 – Характеристики електродвигуна у відносних одиницях.

1.2.6 Розрахувати аналітично і графічно опори ступенів і секцій пускового реостата. Побудувати пускову діаграму (рис. 1.6) виходячи з варіантів завдання по таблиці 1.7.

1.2.7 По природній характеристиці двигуна (рис. 1.6) визначити фактичні сталі швидкості підйому і спуску навантаженого і порожнього візка і порівняти їх з заданою номінальною швидкістю. При визначенні швидкостей зведені до вала двигуна статичні моменти опору прийняти за результатами розрахунку в п. 1.2.2.

1.2.8 Побудувати характеристику $\omega = f(M)$ для режиму гальмування двигуна противімкненням (рис. 1.6) за умови, що початковий гальмівний момент при гальмуванні від встановленої швидкості підйому навантаженого візка дорівнює значенню, наведеному у табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Вихідні дані по варіантам

Номер варіанта	Тип двигуна	Виконання за швидкістю обертання	Число пускових ступенів	Кратність найбільшого моменту	
				При пуску $K_{\Pi}=M_i/M_n$	При гальму- ванні $K_T=M_{T.i}/M_n$
1	Д32	Тихохідне	3	2,5	2
2	МТН311-6	-	3	2	2
3	Д32	Швидкохідне	3	2,5	1,8
4	МТН312-6	-	3	2	1,8
5	Д41	Тихохідне	3	2,5	1,4
6	МТН411-6	-	3	2	1,4
7	Д41	Швидкохідне	4	2,5	1,6
8	МТН412-6	-	3	2	1,6
9	Д806	Тихохідне	3	2	1,8
10	МТН312-8	-	3	2	1,8
11	Д806	Швидкохідне	5	2	2
12	МТН411-8	-	4	2	2
13	Д808	Тихохідне	3	2,5	1,4
14	МТН412-8	-	4	2	1,6
15	Д808	Швидкохідне	5	2	1,8
16	МТН511-8	-	4	2	2
17	Д32	Тихохідне	4	2	1,6
18	МТН311-6	-	4	2	1,8
19	Д32	Швидкохідне	4	2,5	1,4
20	МТН312-6	-	4	2	2
21	Д41	Тихохідне	4	2	1,8
22	МТН411-6	-	4	2	1,6
23	Д41	Швидкохідне	4	3	2
24	МТН412-6	-	4	2	1,8
25	Д808	Тихохідне	4	2	1,8

Продовження таблиці 1.7

Номер варіанта	Тип двигуна	Виконання за швидкістю обертання	Число пускових ступенів	Кратність найбільшого моменту	
				При пуску $K_{\Pi} = M_i / M_n$	При гальму- ванні $K_T = M_{т.і} / M_n$
26	Д32	Тихохідне	3	2,5	2
27	МТН311-6	-	3	2	2
28	Д32	Швидкохідне	3	2,5	1,8
29	МТН312-6	-	3	2	1,8
30	Д41	Тихохідне	3	2,5	1,4
31	МТН411-6	-	3	2	1,4
32	Д41	Швидкохідне	4	2,5	1,6
33	МТН412-6	-	3	2	1,6
34	Д806	Тихохідне	3	2	1,8
35	МТН312-8	-	3	2	1,8
36	Д806	Швидкохідне	5	2	2
37	МТН411-8	-	4	2	2
38	Д808	Тихохідне	3	2,5	1,4
39	МТН412-8	-	4	2	1,6
40	Д808	Швидкохідне	5	2	1,8
41	МТН511-8	-	4	2	2
42	Д32	Тихохідне	4	2	1,6
43	МТН311-6	-	4	2	1,8
44	Д32	Швидкохідне	4	2,5	1,4
45	МТН312-6	-	4	2	2
46	Д41	Тихохідне	4	2	1,8
47	МТН411-6	-	4	2	1,6
48	Д41	Швидкохідне	4	3	2
49	МТН412-6	-	4	2	1,8
50	Д808	Тихохідне	4	2	1,8

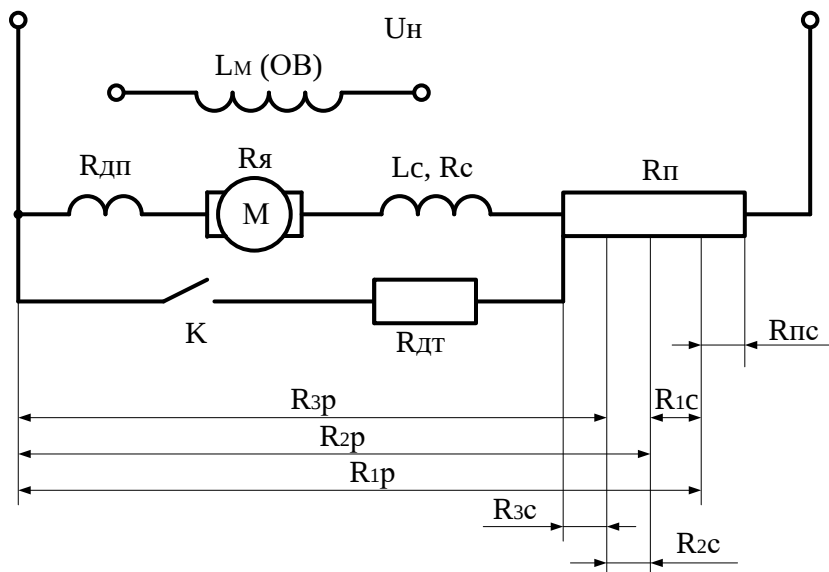


Рисунок 1.7 – Принципова електрична схема силової частини електропривода постійного струму

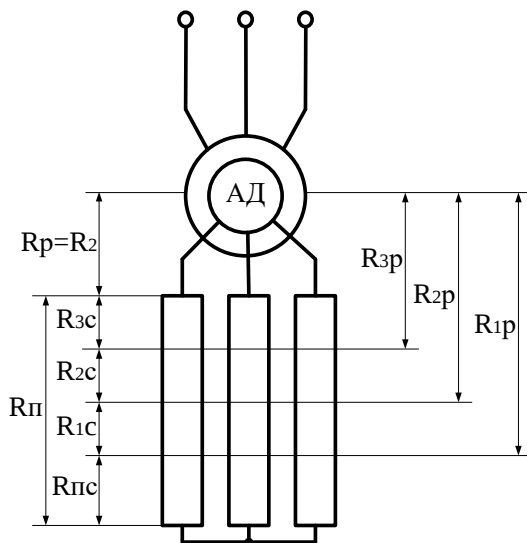


Рисунок 1.8 – Принципова схема силової частини електропривода змінного струму

1.3 Методичні вказівки

1.3.1 При визначенні зусиль, які розвиває двигун на ободі барабана, слід скористатись рис. 1.1,а. Перед цим необхідно визначити сили тяжіння (вагу) візка G_0 , вантажу G_H і противаги G_{II} з виразів [1]:

$$G_0 = m_0 \cdot 0,001 \cdot g;$$

$$G_H = m_H \cdot 0,001 \cdot g;$$

$$G_{II} = m_{II} \cdot 0,001 \cdot g,$$

де G_0 , G_H , G_{II} - вимірюються у кілоньютонах;

m_0 , m_H , m_{II} - в кілограмах;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Складові сили тяжіння, що діють на канат і на колеса візка, при нехтуванні силою тяжіння каната:

$$G_1 = G \cdot \sin \alpha ;$$

$$G_2 = G \cdot \cos \alpha ,$$

де $G = G_0 + G_H$ - для завантаженого візка;

$G = G_0$ - для порожнього візка.

$$\text{Сумарна сила тертя в візку: } F_T = \frac{k \cdot G_2}{D_k} \cdot (\mu \cdot d_{II} + 2 \cdot f) .$$

$$\text{Результуюче окружне зусилля на барабані: } F = G_1 \pm F_T - G_{II} .$$

Знак “+” при F_T береться при підйомі, знак “-” при спуску візка, через те, що сила тертя весь час напрямлена проти напрямку руху. Для того, щоб визначити режим роботи електричної машини (генераторний або режим двигуна), необхідно враховувати знак швидкості. Приймаємо при підйомі швидкість $V = V_H$ більше нуля, а при спуску від'ємною (менше нуля) $-V_H$. Оскільки потужність пропорційна $F \cdot V$, то при однакових знаках результуючого зусилля F і швидкості візка V режим роботи електричної машини буде режимом двигуна, при різних - генераторним або гальмівним. Попередня оцінка режиму роботи електродвигуна дозволяє правильно врахувати ККД барабана η_6 та редуктора η_p при визначенні моментів обертання та потужності на валу барабана та на валу двигуна (при режимі двигуна η_6 і η_p необхідно ставити у знаменниках формул розрахунку для M_c і P_c , при генераторному режимі η_6 і η_p ставлять в якості множників).

1.3.2 Статичні моменти опору на валу барабана для режимів:

а) режим двигуна: $M_{CB} = \frac{F \cdot D_6}{2 \cdot \eta_6}$;

б) режим генератора: $M_{CB} = \frac{F \cdot D_6 \cdot \eta_6}{2}$.

1.3.3 Зведений до вала двигуна статичний момент механізму:

а) режим двигуна: $M_c = \frac{F \cdot D_6}{2 \cdot i_p \cdot \eta_6 \cdot \eta_p}$;

б) режим генератора: $M_c = \frac{F \cdot D_6 \cdot \eta_6 \cdot \eta_p}{2 \cdot i_p}$.

1.3.4 Статичні потужності, що розвиваються на валу двигуна:

а) режим двигуна: $P_c = \frac{F \cdot V_n}{\eta_6 \cdot \eta_p}$;

б) режим генератора $P_c = F \cdot V_n \eta_6 \cdot \eta_p$.

1.3.5 Сумарний зведений до вала двигуна момент інерції:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_T + J_p + \frac{J_6}{i_p^2} + (m_0 + m_n + m_h) \cdot \frac{D_6^2}{4 \cdot i_p^2}. \quad (1.1)$$

1.3.6 Жорсткість гілки канату підйомника визначається так [2]:

$$C_K = E_K S_K / l_K, \quad (1.2)$$

де C_K - жорсткість канату, Н/м;

E_K - модуль пружності канату марки ТК6х19 при розтязі, Н/мм², $E_K = 0,000172$ Н/мм²;

S_K - сумарна площа перетину дроту канату, мм² (табл. 1.6);

l_K - довжина гілки каната візка, м (рис. 1.1, а) $l_K = L + L_1$, шлях підйому L приймають по даним таблиці 2.1.

Припускаючи, що жорсткість вала двигуна, редуктора, барабана і короткої гілки канату противаги L_2 рівною нескінченності, систему електропривода похилого підйомника можна розглядати як двомасове механічне пружне середовище (рис. 1.2). Зведена до вала двигуна жорсткість гілки канату візка може бути обчислена за формулою:

$$C_{12} = C_K \cdot p^2,$$

де C_{12} - зведена жорсткість канату, Нм/рад;

C_K - жорсткість канату, визначена за формулою (1.2), Н/м;

$p = R_6 / i_p$ - радіус зведення, м.

Структурна схема двомасового механічного пружного середовища без врахування затухання наведена на рис. 1.3. Передатна функція двомасового механічного пружного середовища за керуючою дією [3]:

$$W_{\omega 1}(p) = \frac{\omega 1(p)}{M(p)} = \frac{p^2 + J_1 \cdot \Omega_{12}^2 / (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot p(p^2 + \Omega_{12}^2)},$$

де $\Omega_{12}^2 = \frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}$ - квадрат частоти вільних коливань двомасового

механічного пружного середовища, рад/с.

$$W_{\omega 2}(p) = \frac{\omega 2(p)}{M(p)} = \frac{\Omega_{12}^2}{p \cdot (J_1 + J_2) \cdot (p^2 + \Omega_{12}^2)},$$

$$W_{M_{12}}(p) = \frac{M_{12}(p)}{M(p)} = \frac{J_2 \cdot \Omega_{12}^2 / (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot p(p^2 + \Omega_{12}^2)},$$

де $M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$ - пружний момент на канаті, Нм.

1.3.7 Розрахунок природної і штучної характеристик $\omega=f(I_{\text{я}})$ і $\omega=f(M)$ для двигуна постійного струму.

Електромеханічна $\omega=f(I_{\text{я}})$ і механічна $\omega=f(M)$ характеристики двигуна постійного струму відповідно з незалежним або паралельним збудженням описуються наступними рівняннями [2]:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R \cdot I_{\text{я}}}{C_{\text{д}} \cdot \Phi}, \quad \omega = \omega_0 - \frac{R \cdot M}{(C_{\text{д}} \cdot \Phi)^2},$$

де $\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{C_{\text{д}} \cdot \Phi}$ швидкість ідеального неробочого ходу двигуна, рад/с;

$$C_{\text{д}} \cdot \Phi = \frac{U_{\text{н}} - R_{\text{яд}} \cdot I_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} \text{ постійна при } \Phi = \text{const};$$

$R = R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}$ - повний опір кола якоря, Ом;

$R_{\text{д}}$ - додатковий опір, Ом;

$R_{\text{яд}} = 1,32(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{с}})$ - опір кола якоря двигуна в нагрітому стані, Ом;

1,32 - температурний коефіцієнт опору.

При $R_{\text{д}}=0$ характеристика двигуна буде природною.

Природна і штучна характеристики для двигуна постійного струму побудовані на рис. 1.4 по двом точкам. Номінальний момент двигуна на валу визначають з наступного виразу [4], Нм:

$$M_n = P_n / \omega_n,$$

де P_n - номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_n - номінальна швидкість двигуна, рад/с.

Додатковий опір в колі якоря, що забезпечує задану швидкість двигуна $\omega = 0,5\omega_n$ при $I_a = I_n$ ($M = M_n$) визначають з наступного виразу:

$$R_d = R + R_{яд}, \text{ де: } R = \frac{U_n(\omega_0 - 0,5 \cdot \omega_0)}{\omega_0 \cdot I_n}.$$

1.3.8 Природну $\omega=f(M)$ і штучну $\omega=f(I_2)$ характеристики для асинхронного двигуна з фазним ротором розраховують:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \xi)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2 \cdot \xi}. \quad (1.3)$$

Для природної характеристики

$$M^* = \frac{M}{M_n}, \quad I^* = \sqrt{\frac{M^* \cdot S}{S_n}}. \quad (1.4)$$

Для штучної характеристики:

$$I_2^* = \sqrt{\frac{M^* \cdot S \cdot R_2}{S_n \cdot (R_2 + R_d)}}.$$

Природні характеристики розрахувати для ковзань S :

$$-1; -0,7; -S_{Ke}; -S_{Ke}/2; 0; S_n; S_{Ke}; 0,5; 1; 1,5; 2.$$

Критичне ковзання для природної характеристики:

$$R_2' = \kappa_c^2 \cdot R_2, \\ S_{Ke} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (1.5)$$

Критичне ковзання для штучної характеристики:

$$S_k = S_{ku} = \pm \frac{R_2' + R_d'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (1.6)$$

В виразах (1.5) і (1.6) знак "+" беруть для режиму двигуна і режиму противімкнення (рис. 1.5), знак "-" для генераторного (рекуперативного режиму). В формулах (1.3) і (1.6)

$$X_K = X_1 + \kappa_c^2 \cdot X_2, \quad \xi = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}.$$

Максимальний момент генераторного (рекуперативного) режиму

$$M_{\text{кг}} = \frac{-(1 + \xi) \cdot M_K}{(1 - \xi)}.$$

При розрахунку характеристики генераторного режиму роботи АД в виразі (1.3) приймають $M_K = M_{\text{кг}}$, а поточні значення ковзання S і критичне ковзання приймають від'ємними. Номінальний момент і ковзання знаходять з наступних виразів [5]:

$$M = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad S_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{314}{p},$$

де P_n - номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_0, ω_n - відповідно синхронна і номінальна швидкості ротора, рад/с;

p - число пар полюсів АД (таблиця 1.5);

f - частота мережі живлення, Гц.

1.3.9 Для розрахунку штучних характеристик $\omega=f(I_\Delta)$ і $\omega=f(M)$ спочатку необхідно визначити додатковий опір R_Δ , що забезпечує відповідно до завдання швидкості двигуна $\omega=0,5\omega_n$ при $M = M_n$. Додатковий опір в фазі ротора:

$$R_\Delta = \frac{R_2 \cdot (S_u - S_n)}{S_n},$$

де R_2 - активний опір фази ротора, Ом (табл. 1.3);

$$S_u = \frac{\omega_0 - 0,5 \cdot \omega_n}{\omega_0} - \text{штучне ковзання, в.о.}$$

S_n - номінальне ковзання.

Для розрахунку штучних характеристик АД використовують формули (1.3) і (1.4), в виразі (1.3) беруть $S_K = S_u$, яке розраховують по (1.6).

Штучні характеристики $\omega=f(I_2)$ і $\omega=f(M)$ розрахувати для ковзань:

$$-1;-0,7; -0,3; 0; 0,2; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2.$$

1.3.10 При аналітичному розрахунку опорів пускового реостата спочатку знаходять коефіцієнт λ [6]:

$$\lambda = m \sqrt{\frac{R_{1p}}{R_p}},$$

де m - задане число ступенів пуску (табл. 1.7);

$R_{1p} = U_n/I_n$ - повний опір в колі якоря ДПС, Ом;

$$R_{1p} = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot I_n} - \text{повний опір в одній фазі ротора АД, Ом};$$

$I_n = k_n \cdot I_n$ - пусковий струм двигуна, А;

k_n - кратність перенавантаження по струму, приймається рівною кратності перенавантаження по моменту (табл. 1.7);

$R_p = R_{яц} = 1,32(R_{я} + R_{лп} + R_c)$ - внутрішній опір кола якоря ДПС, Ом (табл. 1.2);

$R_p = R_2$ - опір фазної обмотки ротора асинхронного двигуна, Ом (табл. 1.3);

$I_n = I_{2n}$ - номінальний струм ротора асинхронного двигуна, А. (табл. 1.3)

1.3.11 Момент перемикавання двигуна

$$M_2 = \frac{M_1}{\lambda},$$

де $M_1 = k_n \cdot M_n$ - пусковий момент двигуна, Нм.

1.3.12 Опір ступенів пускового реостату

$$R_{1p} = R_p \cdot \lambda^m; \quad R_{2p} = R_p \cdot \lambda^{m-1} \text{ і т.д.}$$

1.3.13 Опір секції пускового реостата

$$R_{1c} = R_{1p} - R_{2p}; \quad R_{2c} = R_{2p} - R_{3p} \text{ і т.д.}$$

1.3.14 Повний опір пускового реостата

$$R_{\text{реост}} = R_{1p} - R_p$$

1.3.15 При графічному розрахунку спочатку розраховують опір R_{1p} по номінальній напрузі і пусковому струму.

1.3.16 Визначають масштаб опорів (рис. 1.6): $m_R = \frac{R_{1p}}{ae}$

1.3.17 Далі визначають опори секцій і загальний опір пускового реостата:

$$R_{1c} = m_R \cdot \overline{ab}; \quad R_{2c} = m_R \cdot \overline{bc}; \quad R_{3c} = m_R \cdot \overline{cd}; \quad R_{\text{реост}} = m_R \cdot (\overline{af} - \overline{ef}).$$

1.3.18 Швидкість сталого руху візка, м/с:

$$V = \frac{\omega_c \cdot D_6}{2 \cdot i_p},$$

де ω_c - швидкість двигуна по природній характеристиці, рад/с;

D_6 - діаметр барабана, м;

i_p - передаточне число редуктора.

1.3.19 Характеристику противімкнення 2 (рисунок 1.6) будують по двом точкам: $(\omega_{c1}; M_{T1})$, $(-\omega_0; M=0)$. Початковий момент при гальмуванні M_{T1} визначають виходячи з варіантів завдання (табл. 1.7)

1.3.20 Опір ступені противімкнення визначають по графіку (рис. 1.6):

$$R_{\Pi} = m_R \cdot \overline{df}.$$

1.3.21 Опір секції противімкнення $R_{\text{пс}} = R_{\Pi} - R_{\text{реост}}$.

1.3.22 Початкове значення моменту M'_{T1} при спуску порожнього візка визначають з графічних побудов (рис. 1.6), проводячи промінь 2' паралельно проміню 2 і горизонталь з точки ω_{c3} до перетину з промінем 2'. Момент M'_{T1} використовують в наступному завданні.

1.3.23 Характеристику динамічного гальмування 3 (рис. 1.6) для двигуна постійного струму будують по двом точкам:

$$(\omega = 0; M = 0), (\omega = 0,3 \omega_n; M = M_{c4}).$$

1.3.24 Опір динамічного гальмування для двигуна постійного струму:

$$R_{\text{дт}} = m_R \cdot \overline{gk}$$

де $\overline{gk}$ знаходять з рис. 6.1, попередньо провівши промінь 0K паралельно природній характеристиці 1.

1.3.25 Принципова схема для двигуна постійного струму наведена на рис. 1.7, для двигуна змінного струму - на рис. 1.8.

2 РОЗРАХУНОК ДІАГРАМИ НАВАНТАЖЕННЯ І ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ЗА НАГРІВОМ

2.1 Вихідні дані

2.1.1 В якості робочого механізму, для якого розраховують діаграму навантаження електропривода і перевіряють по умовам нагріву попередньо обраний за потужністю двигун, обраний похилий підйомник, який розглядався в розділі 1.

2.1.2 Підйомник працює в повторно - короточасному режимі.

2.1.3 В цикл роботи двигуна входять наступні операції (рис.2.1):

а) навантаження візка за час t_{01} (табл. 2.1);

б) реостатний пуск, сталий рух і електричне гальмування проти-вімкненням до повної зупинки при підйомі візка з номінальним вантажем (час t_{n1} , t_{y1} , t_{T1} на рисунку 2.1);

в) розвантаження візка за час t_{02} (табл. 2.1);

г) те ж, що і в б), але при спуску порожнього візка (час t_{n2} , t_{y2} , t_{T2} на рис. 2.1);

2.1.4 В періоди навантаження і розвантаження двигун відімкнутий, а візок втримується за допомогою електромеханічного гальма.

2.2 Завдання

2.2.1 Визначити час пуску, час електричного гальмування та час сталого руху при підйомі навантаженого візка і спуску порожнього, також час циклу і тривалість ввімкнення двигуна.

Примітка. Дані про статичні моменти і моменти інерції, зведених до вала двигуна, пускові і гальмівні характеристики використати з розділа 1, пункти 1.3.3, 1.3.5, рис. 1.6 при розрахунку часу пуску і гальмування коливальними явищами від пружності канатів знехтувати, тобто роздивляти систему при $C \approx \infty$.

2.2.2 Побудувати спрощені діаграми навантаження $M = f(t)$ і швидкісну $V = f(t)$ діаграми електропривода (рис. 2.1), змінивши на час пуску і гальмування фактичні експоненційні залежності моменту і швидкості в функції часу відрізками прямих.

2.2.3 Визначити з діаграми навантаження еквівалентний момент двигуна за цикл роботи і зробити висновок про можливість використання обраного в розділі 1 електродвигуна для роботи по отриманому графіку навантаження.

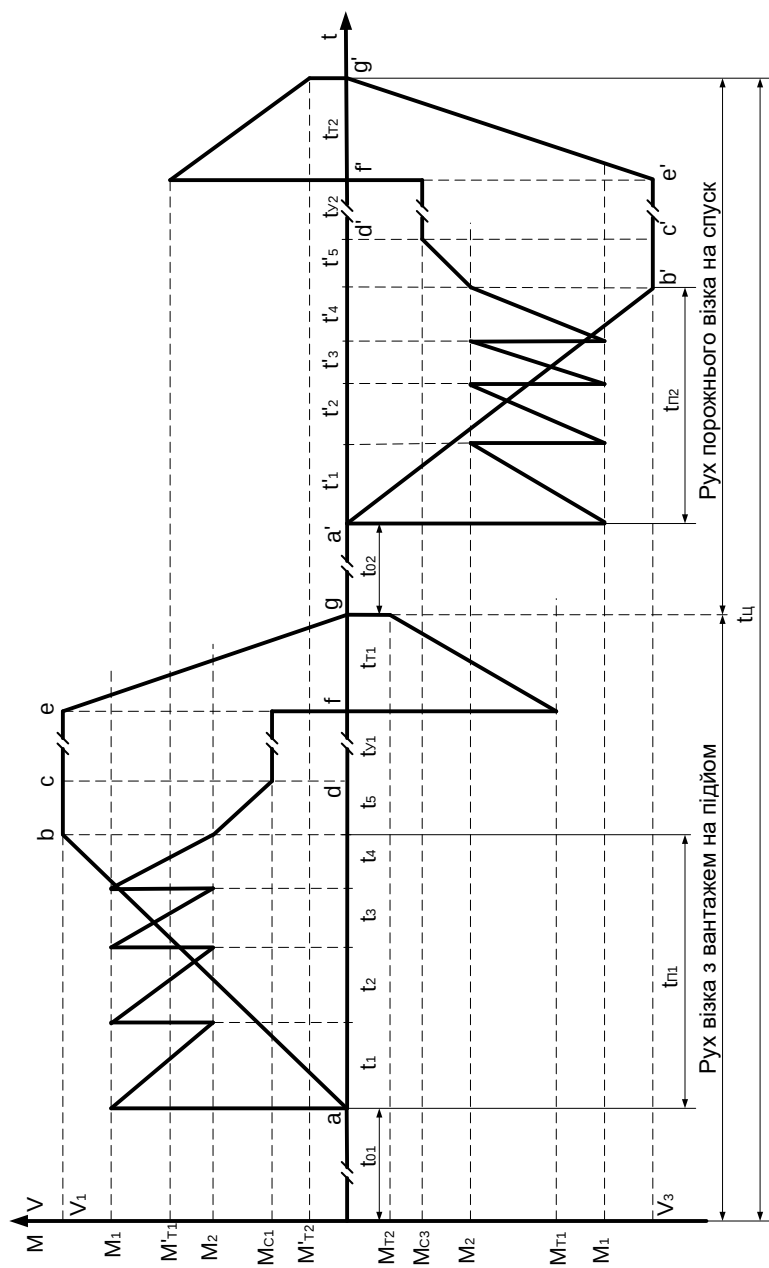


Рисунок 2.1 – Діаграми навантаження і швидкості

Таблиця 2.1 - Вихідні дані по варіантам

Номер варіанта	Шлях підйому L, м	Час, с	
		Навантаження t_{01}	Розвантаження t_{02}
1	8	60	60
2	10	80	70
3	12	50	40
4	15	100	90
5	20	45	45
6	25	35	35
7	20	70	60
8	30	30	30
9	6	40	20
10	40	260	180
11	10	30	30
12	5	20	20
13	20	100	100
14	25	120	60
15	30	180	45
16	35	100	100
17	5	15	15
18	6	40	30
19	50	200	100
20	48	170	110
21	46	120	120
22	45	200	150
23	9	90	90
24	40	80	80
25	20	95	95

Продовження таблиці 2.1

Номер варіанта	Шлях підйому L, м	Час, с	
		Навантаження t_{01}	Розвантаження t_{02}
26	8	60	60
27	10	80	70
28	12	50	40
29	15	100	90
30	20	45	45
31	25	35	35
32	20	70	60
33	30	30	30
34	6	40	20
35	40	260	180
36	10	30	30
37	5	20	20
38	20	100	100
39	25	120	60
40	30	180	45
41	35	100	100
42	5	15	15
43	6	40	30
44	50	200	100
45	48	170	110
46	46	120	120
47	45	200	150
48	9	90	90
49	40	80	80
50	20	95	95

2.3 Методичні вказівки

2.3.1 Час пуску, час сталого руху і час електричного гальмування є елементами діаграми навантаження. Для розрахунку часу пуску і гальмування при лінійній механічній характеристиці двигуна і $M_c = \text{const}$ можна використовувати формули з [7].

Час розгону на кожній ступені пуску для візка:

$$\text{а) навантаженого } t_x = T_x \cdot \ln \frac{M_1 - M_{c1}}{M_2 - M_{c1}};$$

$$\text{б) порожнього } t'_x = T'_x \cdot \ln \frac{M_1 - M_{c3}}{M_2 - M_{c3}},$$

де T_x, T'_x - електромеханічні постійні часу при пуску відповідно навантаженого і порожнього візка, с;

M_1, M_2 - найбільший момент при пуску і момент перемикання (рис. 1.6), Нм;

M_{c1} - статичний момент при підйомі навантаженого візка, Нм;

M_{c3} - статичний момент при спуску порожнього візка, Нм.

2.3.2 Електромеханічні постійні часу при пуску навантаженого і порожнього візка, с:

$$T_x = \frac{J_{\text{пр}} \cdot \Delta\omega_x}{M_1 - M_2}; T'_x = \frac{J_{\text{пор}} \cdot \Delta\omega_x}{M_1 - M_2},$$

де $J_{\text{пр}}, J_{\text{пор}}$ - сумарний момент інерції привода J_{Σ} при пуску відповідно навантаженого та порожнього візка, кгм^2 (розділ 1.1);

$\Delta\omega_x$ - приріст швидкості на кожній ступені, відповідно до приросту моменту $\Delta M = M_1 - M_2$.

Приріст швидкості $\Delta\omega_x$ на кожній ступені пуску визначають з рис. 1.6. Для першої ступені пуску $\Delta\omega_x = \Delta\omega_1 = \omega_1$; для другої - $\Delta\omega_x = \Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_1$; для третьої - $\Delta\omega_x = \Delta\omega_3 = \omega_3 - \omega_2$; для природної характеристики - $\Delta\omega_x = \Delta\omega_4 = \omega_4 - \omega_3$.

2.3.3 Час розгону від швидкості $\Delta\omega_4$ до $\Delta\omega_{c1}$ і від $\Delta\omega_4$ до $\Delta\omega_{c3}$ (рис. 1.6) визначаються:

$$t_5 = (3...4) \cdot T_e; t'_5 = (3...4) \cdot T'_e,$$

T_e, T_e' - електромеханічні постійні часу для природної характеристики при підйомі навантаженого і опусканні порожнього візка, с.

2.3.4 Загальний час пуску навантаженого t_{Π} і порожнього t'_{Π} візків:

$$t_{\Pi} = t_1 + t_2 + \dots + t_5; \quad t'_{\Pi} = t'_1 + t'_2 + \dots + t'_5.$$

2.3.5 Час гальмування противвімкненням від сталої швидкості до повної зупинки для візка [8]

$$\text{а) навантаженого } t_{T1} = T_{T1} \cdot \ln \frac{M_{T1} + M_{C1}}{M_{T2} + M_{C1}};$$

$$\text{б) порожнього } t_{T2} = T_{T2} \cdot \ln \frac{M'_{T1} + M_{C3}}{M'_{T2} + M_{C3}},$$

де T_{T1}, T_{T2} - електромеханічні постійні часу привода при гальмуванні противвімкненням відповідно при підйомі навантаженого і опусканні порожнього візка, с;

$M_{T1}, M_{T2}, M'_{T1}, M'_{T2}, M_{C1}, M_{C3}$, - гальмівні моменти двигуна і моменти статичних опорів, Нм (рис. 1.6).

2.3.6 Електромеханічні постійні часу електропривода при гальмуванні противвімкненням візка з вантажем і без знаходять:

$$T_{T1} = \frac{J_{\text{гр}} \cdot \omega_{C1}}{M_{T1} - M_{T2}}; \quad T'_{T2} = \frac{J_{\text{пор}} \cdot \omega_{C3}}{M'_{T1} - M'_{T2}},$$

де $J_{\text{гр}}, J_{\text{пор}}$ - сумарний момент інерції привода при гальмуванні візка з вантажем на підйом і без вантажу на спуск, кгм^2 (розділ 1); ω_{C1}, ω_{C3} - визначають з рис. 1.6.

2.3.7 Для розрахунку часу сталого руху t_{y1}, t_{y2} необхідно визначити шляхи і швидкості сталого руху.

2.3.8 Шлях сталого руху при підйомі або спуску візка визначають як різницю заданого шляху L (таблиця 2.1) і шляхів, які проходить візок при спуску і гальмуванні. Ці шляхи визначають з побудов діаграми швидкості (рис.2.1), де V_1 і V_3 беруть з пункту 1.3.18. Шлях, який проходить візок з вантажем при спуску та підйом, дорівнює площі трапеції $abcd$, при гальмуванні - площі трикутника efg . Анало-

гічно визначають шляхи пуску і гальмування при опусканні порожнього візка (площі $a'b'c'd'$ і $e'f'g'$).

2.3.9 Вирази для розрахунку пуску і гальмування

а) при підйомі візка з вантажем:

$$L_{\Pi 1} = \frac{V_1 \cdot t_{\Pi 1}}{2} + V_1 \cdot t_5; \quad L_{T1} = \frac{V_1 \cdot t_{T1}}{2};$$

б) при спуску порожнього візка:

$$L_{\Pi 2} = \frac{V_3 \cdot t_{\Pi 2}}{2} + V_3 \cdot t_5'; \quad L_{T2} = \frac{V_3 \cdot t_{T2}}{2}.$$

2.3.10 Шляхи і часи сталого руху:

а) при підйомі візка з вантажем:

$$L_{y1} = L - (L_{\Pi 1} + L_{T1}); \quad t_{y1} = \frac{L_{y1}}{V_1};$$

б) при спуску порожнього візка:

$$L_{y2} = L - (L_{\Pi 2} + L_{T2}); \quad t_{y2} = \frac{L_{y2}}{V_3}.$$

2.3.11 Тривалість ввімкнення двигуна візка, %:

$$\Pi B = \frac{\sum t_{\Pi} + \sum t_y + \sum t_T}{t_{\Pi}} \cdot 100,$$

де $t_{\Pi} = \sum t_{\Pi} + \sum t_y + \sum t_T + \sum t_0$ - час циклу, с;

$\sum t_{\Pi}, \sum t_y, \sum t_T, \sum t_0$ - сумарний час відповідно пуску, сталого руху, гальмування і пауз, с.

2.3.12 Побудова залежностей $M = f(t)$ і $V = f(t)$ наведена на рис. 2.1. Складові часу пуску і гальмування необхідно будувати в масштабі, інші часи - без масштабу.

2.3.13 Еквівалентний момент для трапецієвидних графіків:

а) на ділянках $t_i = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ а також $t_i = t_1' + t_2' + t_3' + t_4'$:

$$M_i^2 = \frac{M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2}{3};$$

б) на ділянках $t_i = t_5$ а також $t_i = t_5'$:

$$M_i^2 = \frac{M_2^2 + M_1 \cdot M_C + M_C^2}{3},$$

де $M_C = M_{C1}$ для t_5 ; $M_C = M_{C3}$ для t_5'

в) на ділянках $t_i = t_{T1}$ а також $t_i = t_{T2}'$:

$$M_i^2 = \frac{M_{T1}^2 + M_{T1} \cdot M_{T2} + M_{T2}^2}{3}.$$

Еквівалентний момент для прямокутних графіків на ділянках $t_i = t_{y1}$ а також $t_i = t_{y2}'$:

$$\left. \begin{aligned} M_i^2 &= M_{C1}^2 \\ M_i^2 &= M_{C3}^2 \end{aligned} \right\}.$$

2.3.14 Для привода візка прийнятий двигун повторно-короткочасного режиму роботи, еквівалентний момент необхідно знаходити за час фактичної роботи, без врахування пауз, за формулою [9]:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum (M_i^2 \cdot t_i)}{T_{екв}}},$$

де $T_{екв} = \alpha \cdot (\sum t_{\Pi} + \sum t_T) + \sum t_y$.

Коефіцієнт α враховує погіршення охолодження двигуна при пуску та гальмуванні: $\alpha=0,75$ - для машин постійного струму, $\alpha=0,5$ - для машин змінного струму (АД) [10].

2.3.15 Отриманий еквівалентний момент необхідно привести по формулі $M_{е.ст.} = M_e \cdot \sqrt{\frac{ТВ}{ТВ_{СТ}}}$ до найближчого стандартного значення

тривалості ввімкнення $ТВ_{СТ} = 15, 25, 40, 60$ %. Якщо $M_{д.ст} > M_{е.ст}$, то двигун підходить. $M_{д.ст}$ - момент обраного двигуна при тій самій стандартній тривалості ввімкнення, що і $M_{е.ст}$, знаходять по таблиці 1.4, 1.5. Наприклад, якщо $ТВ_{СТ}=25\%$, то

$$M_{д25\%} = \frac{P_{25\%}}{\omega_{25\%}},$$

де $M_{д25\%}$ - момент, Нм;

$P_{25\%}$ - потужність, Вт;

$\omega_{25\%} = \frac{\pi \cdot n_{25\%}}{30}$ - кутова швидкість двигуна при $ТВ_{СТ}=25\%$.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

3.1 Моделювання природних і штучних механічних характеристик ДПС НЗ в середовищі MatLab

Моделювання роботи ДПС з незалежним збудженням проводиться в середовищі MatLab. Піктограма зображення ДПС в середовищі MatLab приведена на рис. 3.1 [11].

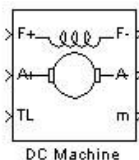


Рисунок 3.1 – Піктограма зображення ДПС в середовищі MatLab

Призначення:

Моделює електричну машину постійного струму.

Порти моделі A^+ і A^- – є виводами обмотки якоря машини, а портами F^+ і F^- – є виводи обмотки збудження. Порт TL призначений для подачі моменту опору руху. На вихідному порту m формується векторний сигнал, що складається з чотирьох елементів: швидкості, струму якоря, струму збудження і електромагнітного моменту машини [11].

Схема моделі машини постійного струму представлена на рис. 3.2.

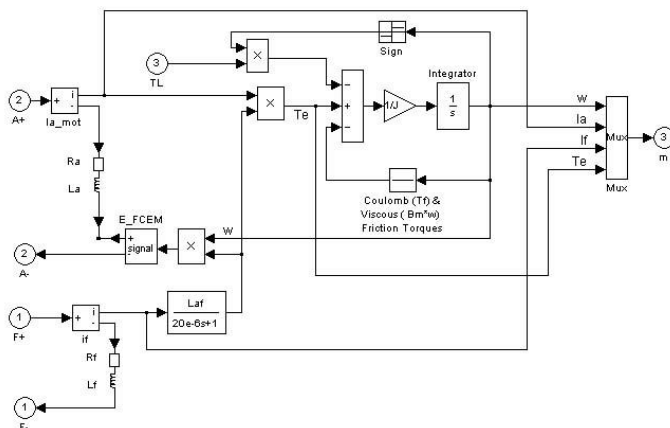


Рисунок 3.2 – Математична модель електродвигуна постійного струму

Ланцюг якоря машини представлений послідовно включеними елементами R_a - активний опір якорному ланцюгу, L_a - індуктивність якорного ланцюга і E_{FCSEM} - ЕРС обмотки якоря (кероване джерело напруги). Величина ЕРС обмотки якоря обчислюється за виразом:

$$E = K_e \omega ,$$

де E – ЕРС обмотки якоря;

ω - кутова швидкість обертання валу електродвигуна;

K_e - коефіцієнт пропорційності між швидкістю і ЕРС.

Коефіцієнт пропорційності між швидкістю і ЕРС залежить від величини струму обмотки збудження машини:

$$K_e = L_{af} I_f ,$$

де L_{af} – взаємодуктивність між обмотками якоря і збудження;

I_f - струм обмотки збудження машини.

Ланцюг збудження машини представлений на схемі елементами R_a і L_a - активний опір і індуктивність обмотки збудження.

Механічна частина моделі обчислює швидкість обертання валу машини відповідно до рівняння:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + \text{sign}(T_L) ,$$

де T_e – електромагнітний момент машини;

B – коефіцієнт в'язкого тертя;

T_L – коефіцієнт сухого тертя.

Механічна частина моделі представлена інтегратором і підсилювачем з коефіцієнтом передачі $1/J$ а також відповідними суматорами і помножувачем [12].

Величина електромагнітного моменту машини обчислюється відповідно до виразу

$$T_e = K_T \cdot I_a ,$$

де I_a - струм якоря;

K_T - коефіцієнт пропорційності між електромагнітним моментом і струмом якоря. По величині коефіцієнт K_T рівний K_E .

Вікно завдання параметрів ДПС представлено на рис. 4.3.

Параметри блоку:

Armature resistance and inductance [R_a (ohms) L_a (H)]:

[Активний опір R_a (Ом) і індуктивність L_a (Гн) ланцюга якоря].

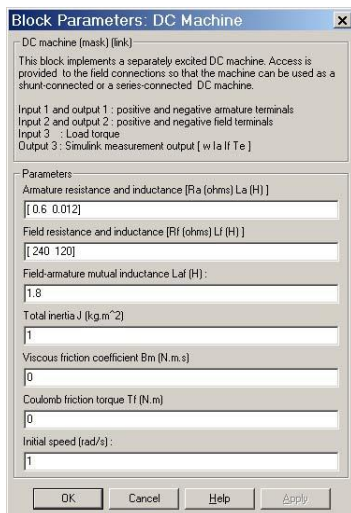


Рисунок 3.3 – Вікно завдання параметрів ДПС

Field resistance and inductance [R_f (ohms) L_f (H)]:

[Активний опір R_f (Ом) і індуктивність L_f (Гн) ланцюга збудження].

Field-armature mutual inductance L_{af} (H):

[Взаємна індуктивність між ланцюгом якоря і ланцюгом збудження двигуна (Гн)].

Total inertia J (kg.m²):

[Момент інерції двигуна J (кг·м²)].

Viscous friction coefficient B_m (N.m.s):

[Коефіцієнт в'язкого тертя B_m (Нмс)].

Coulomb friction torque T_f (Nm):

[Реактивний момент опору T_f (Нм)].

Initial speed (rad/s):

[Початкова кутова швидкість валу двигуна (рад/с)].

Параметри машини постійного струму з незалежним збудженням можна визначити на основі її каталожних даних по наступних видах [13]:

- номінальний струм обмотки збудження:

$$I_{\epsilon} = \frac{P_n}{U_{ян} \eta_n} - I_{ян} \quad \text{або} \quad I_{\epsilon} = \frac{U_{\epsilon}}{R_{\epsilon}} \text{ A;}$$

- номінальний момент опору: $M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30P_n}{\pi\omega_n} \text{ Нм};$
- взаємна індуктивність між ланцюгом якоря і ланцюгом збудження двигуна $L_{af} = \frac{M_n}{I_{ян} I_\epsilon} \text{ Гн};$
- індуктивність обмотки збудження: $L_\epsilon \geq (2-5) \frac{L_{я} R_\epsilon}{R_{я}} \text{ Гн};$
- момент інерції електродвигуна: $J \geq (2-5) \frac{L_{я} P_n^2}{R_{я}^2 \omega_n^2 I_{ян}^2} \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$
- механічні втрати електродвигуна $P_{мех} = (0.5-2.0)\% \cdot P_n;$
- реактивний момент опору: $T_f \cong \frac{P_{мех}}{2\omega_n};$
- коефіцієнт в'язкого тертя: $B_m \cong \frac{P_{мех}}{2\omega_n^2};$

де I_ϵ – струм обмотки збудження; U_ϵ – напруга обмотки збудження; R_ϵ – активний опір обмотки збудження; L_ϵ – індуктивність обмотки збудження; $I_{ян}$ – номінальний струм обмотки якоря; $U_{ян}$ – номінальна напруга обмотки якоря; $R_{я}$ – активний опір обмотки якоря; M_n – номінальний момент; P_n – номінальна потужність; n_n – номінальна частота обертання якоря (об/хв); ω_n – номінальна кутова швидкість обертання якоря (рад/с); $P_{мех}$ – загальні механічні втрати машини.

Індуктивність якрірного ланцюга може бути знайдена за формулою:

$$L_{я} = C \frac{U_{ян}}{I_{ян} n_n p},$$

де $C=(1\div 2.5)$ для машин з компенсаційною обмоткою (велика величина відноситься до тихохідних двигунів), $C=6$ для некомпенсованих машин, p – число пар полюсів.

Приклад 3.1.

На рис.3.4 показана схема, що забезпечує пуск двигуна за допомогою триступінчатого пускового пристрою (блок Motor Starter). На рисунку показані також графіки зміни швидкості і електромагнітного моменту двигуна у функції часу і динамічна механічна характеристика

машини, побудована за допомогою блоку XY-Graph. У прикладі момент опору руху, залежний від швидкості, задається за допомогою пропорційної підсилювальної ланки *Gain*.

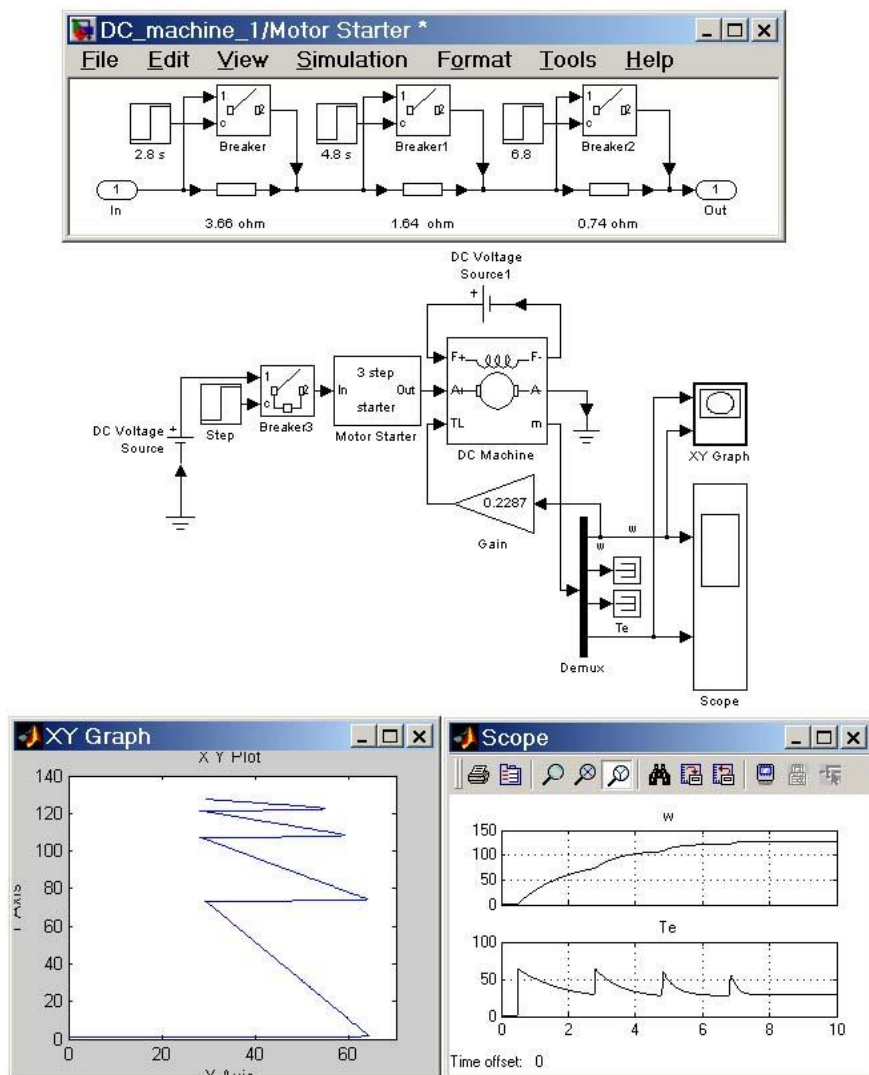


Рисунок 3.4 - Схема реостатного пуску ДПС в три ступені

Примітка: У бібліотеці *Machines* представлена також дискретна модель машини постійного струму - *Discrete DC_Machine*. Модель відрізняється від розглянутої вище – використанням блоків дискретних передавальних функцій. У вікні діалогу блоку також присутній параметр *Sample time (s)* – крок дискретизації.

Приклад 3.2.

На рис.3.5 показана схема, що демонструє регулювання швидкості ДПС з незалежним збудженням при зменшенні величини напруги живлення. На рисунку показані також графіки зміни швидкості і електромагнітного моменту двигуна у функції часу і динамічна механічна характеристика машини, побудована за допомогою блоку XY-Graph. У прикладі момент опору руху, залежний від швидкості, задається за допомогою блоку завдання *Constant*.

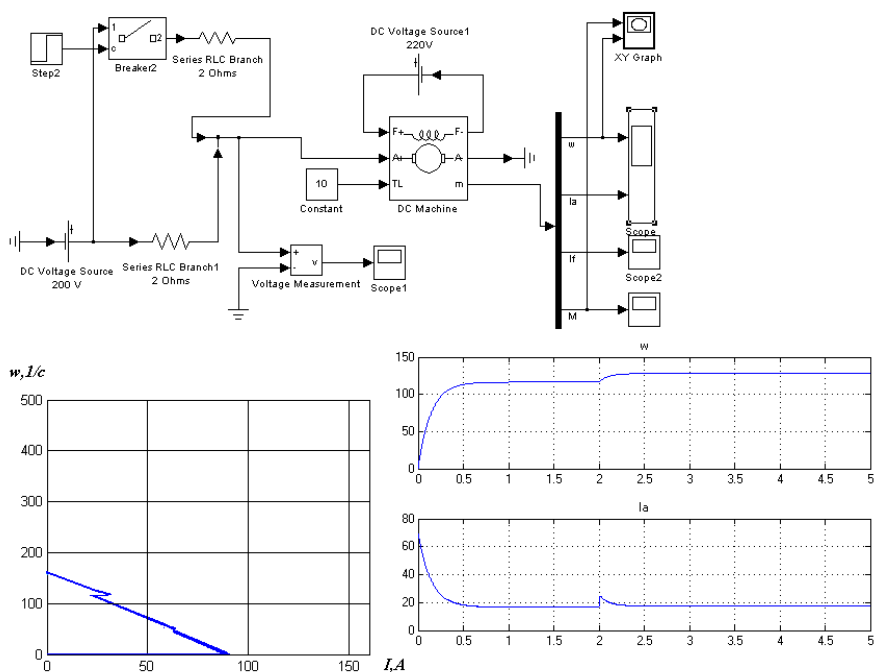


Рисунок 3.5 - Схема регулювання швидкості ДПС шляхом зміни величини напруги живлення

Приклад 3.3.

На рис.3.6 показана схема, що демонструє регулювання швидкості ДПС з незалежним збудженням при ослабленні магнітного потоку в обмотці збудження. На малюнку показані також графіки зміни швидкості і електромагнітного моменту двигуна у функції часу і динамічна механічна характеристика машини.

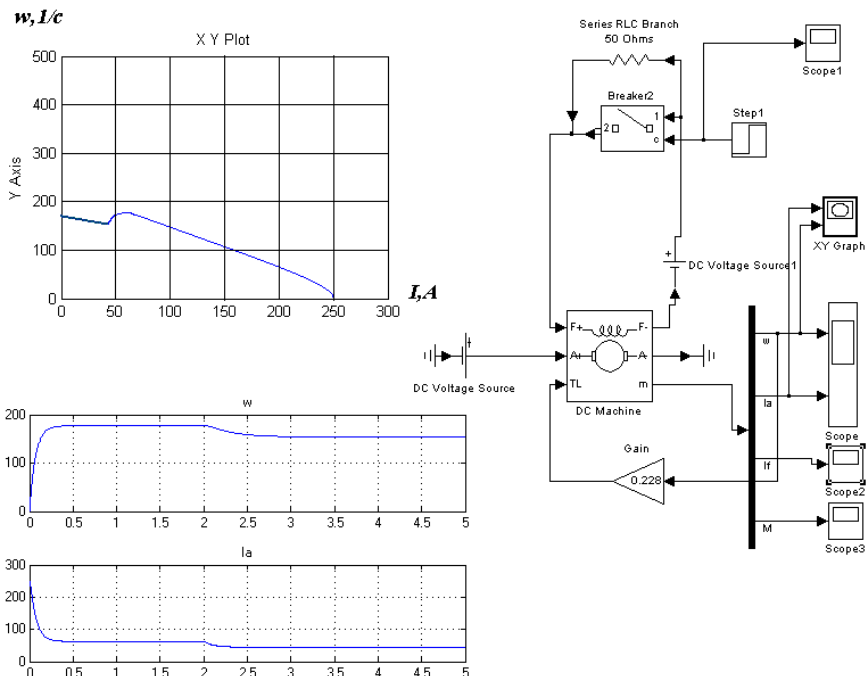


Рисунок 3.6 - Схема регулювання швидкості ДПС шляхом зменшення величини магнітного потоку в обмотці збудження

Загальні вказівки до виконання курсового проекту

Відповідно до варіанту завдання розрахувати вхідні параметри ДПС незалежного збудження необхідні для моделювання в середовищі MatLab і змоделювати:

- природну електромеханічну і механічну характеристику ДПС, графіки зміни сили струму якоря і швидкості обертання валу двигуна у функції часу. Визначити по характеристиках номінальну величину

коефіцієнта потоку обмотки збудження ($\kappa\Phi_n$);

- штучну механічну або електромеханічну характеристику при ослабленому потоці збудження, графіки зміни сили струму якоря і швидкості обертання валу двигуна у функції часу. Величину додаткового опору в обмотці збудження прийняти рівною $50 \div 100$ Ом;

- штучну механічну або електромеханічну характеристику при зниженні величини напруги живлення в 2 рази, графіки зміни сили струму якоря і швидкості обертання валу двигуна у функції часу.

- штучну механічну або електромеханічну характеристику при реостатному багатоступінчатому пуску, графіки зміни сили струму якоря і швидкості обертання валу двигуна у функції часу;

3.2 Моделювання природних і штучних механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним і короткозамкненим ротором в середовищі MatLab

Короткі відомості.

Моделювання роботи АД з фазним і короткозамкнутим ротором проводиться в середовищі MatLab. Піктограма зображення АД в середовищі MatLab приведена на рис. 4.7.

Піктограма:

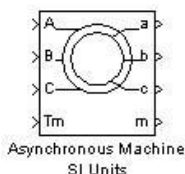


Рисунок 3.7 – Піктограма зображення АД в середовищі MatLab

Призначення:

Моделює асинхронну електричну машину в руховому або генераторному режимах. Режим роботи визначається знаком електромагнітного моменту машини.

Порти моделі A, B і C є виводами обмотки статора машини, а порти a, b і c - обмотки ротора машини. Порт T_m призначений для подачі моменту опору руху. На вихідному порту m формується векторний сигнал, що складається з 21 елементу: струмів, потоків і напруги ротора і статора в нерухомих та обертових системах координат, елект-

ромагнітного моменту, швидкості обертання валу, а також його кутового положення. Для зручності витягання змінних машини з вектора в бібліотеці *SimPowerSystems* передбачений блок *Machines Measurement Demux*. Модель асинхронної машини включає модель електричної частини, представлена моделлю простору станів четвертого порядку і модель механічної частини у вигляді системи другого порядку. Всі електричні змінні і параметри машини приведені до статора. Початкові рівняння електричної частини машини записані для двофазної (dq-осі) системи координат.

Вікно завдання параметрів зображене на рис. 3.8.

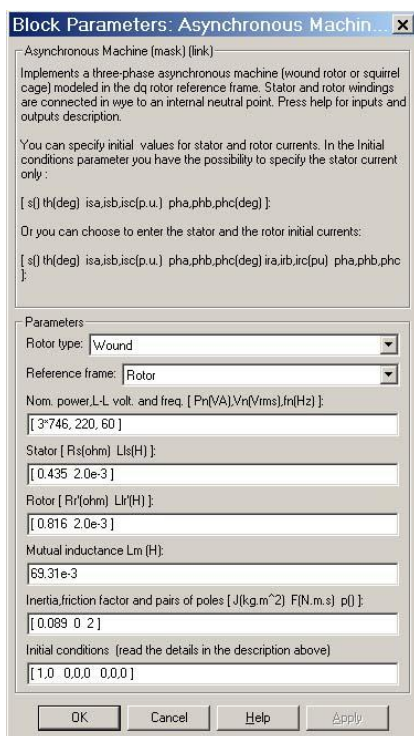


Рисунок 3.8 – Вікно завдання параметрів АД

Параметри блоку:
Rotor type:

[Тип ротора]. Значення параметра вибирається із списку:
 Squirrel-Cage - короткозамкнений ротор або <біляча клітка>
 Wound - фазний ротор.

Reference frame:

[Система координат]. Значення параметра вибирається із списку:

Rotor - нерухома щодо ротора;

Stationary - нерухома щодо статора;

Synchronous - що обертається разом з полем.

Nom. power, L-L volt. and frequency [$P_n(VA)$, $U_n(V)$, $f_n(Hz)$]:

[Номінальна потужність P_n (ВА), лінійна напруга U_n (В) і номінальна частота f_n , (Гц)].

Stator [$R_s(Ohm)$ $L_s(H)$]:

[Опір R_s (Ом) і індуктивність L_s (Гн) статора].

Rotor [$R_r(Ohm)$ $L_r'(H)$]:

[Опір R_r (Ом) і індуктивність L_r (Гн) ротора].

Mutual inductance $L_m(H)$:

[Взаємна індуктивність (Гн)].

Inertia, friction factor and pairs of poles [$J(kg \cdot m^2)$ $F(N \cdot m \cdot s)$ p]:

[Момент інерції J ($kg \cdot m^2$), коефіцієнт тертя F ($N \cdot m \cdot s$) і число пар полюсів p].

Initial conditions [s th(deg) isa , isb , $isc(A)$ phA , phB , $phC(deg)$]:

[Початкові умови]. Параметр задається у вигляді вектора кожен елемент, якого має наступні значення:

s – ковзання;

th - фаза (град.);

isa , isb , isc - початкові значення струмів статора (А);

phA , phB , phC - початкові фази струмів статора (град.).

Початкові умови машини можуть бути обчислені за допомогою блоку *Powergui*.

Початковими даними для розрахунку параметрів машини є наступні:

P_n – номінальна потужність [Bm];

U_n – номінальна лінійна напруга [В];

f_1 – частота мережі [Гц];

n_n – номінальна швидкість обертання валу [s^{-1}];

p – число пар полюсів;

η - коефіцієнт корисної дії [о.е.];

K_I – коефіцієнт потужності [о.е.], $K_I=1,35$;

I_n – номінальний струм статора [А];

λ_n – кратність пускового струму, моменту [о.е.];

λ – кратність максимального моменту [о.е.];

J - момент інерції [кг·м²].

Параметри асинхронної машини можна розраховуються за наступними виразами:

$$- U_{\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} - \text{номінальна фазна напруга [В];}$$

$$- n_1 = \frac{60 f_1}{p} - \text{швидкість обертання магнітного поля (синхронна швидкість) [об/хв];}$$

$$- S_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} - \text{номінальне ковзання [о.е.];}$$

$$- S_{kp} = S_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) - \text{критичне ковзання [о.е.];}$$

$$- \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} - \text{швидкість обертання магнітного поля (синхронна швидкість) [с⁻¹];}$$

$$- \omega_n = \frac{\pi n_n}{30} - \text{номінальна кутова швидкість обертання валу [с⁻¹];}$$

$$- M_n = \frac{P_n}{\omega_n} - \text{номінальний момент [Нм];}$$

$$- M_{\max} = \lambda M_n - \text{максимальний момент [Нм];}$$

$$- M_n = \lambda M_n - \text{пусковий момент [Нм];}$$

$$- P_{\text{мех}} = (0,01 \div 0,05) P_n - \text{механічні втрати [Вт];}$$

$$- C = (1,01 \div 1,05) - \text{коефіцієнт приведення (менше значення для машин більшої потужності);}$$

$$- R_r = \frac{1}{3} \frac{P_n + P_{\text{мех}}}{I_n^2 \frac{1 - S_n}{S_n}} - \text{приведений активний опір ротора [Ом];}$$

$$- R_s = \frac{U \cos \phi (1 - \eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{P_{\text{мех}}}{3 I_n^2} - \text{активний опір статора [Ом];}$$

$$- L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi f_1 (1 + C^2) K_I I_n} - \text{приведена індуктивність розсі-}$$

яння статора і ротора [Гн];

$$- L_s = \frac{U}{2\pi f_1 I_n \sqrt{1 - \cos^2(\phi)}} - \frac{2}{3} \frac{2\pi f_1 M_{\text{max}} S_n}{pU S_{kp}} - \text{індуктивність ста-}$$

тора [Гн];

$$- L_m = L - L_{sp} - \text{індуктивність ланцюга намагнічення [Гн].}$$

Після закінчення розрахунку необхідно визначити коефіцієнт приведення $C1 = 1 + \frac{L_{sp}}{L_m}$ і порівняти його з раніше прийнятим коефіцієнтом C . При необхідності розрахунок слід повторити, добиваючись мінімальної різниці між C і $C1$.

Модельовання трифазного перемикача змінного струму

Модельовання роботи АД трифазного перемикача змінного струму проводиться в середовищі MatLab. Піктограма зображення трифазного перемикача змінного струму в середовищі MatLab приведена на рис. 3.9.

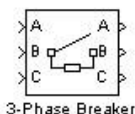


Рисунок 3.9 - Піктограма зображення трифазного перемикача змінного струму в середовищі MatLab

Призначення:

Моделює трифазний пристрій включення і виключення змінного струму. Складається з трьох блоків *Breaker*, керованих одним сигналом.

Вікно завдання параметрів:

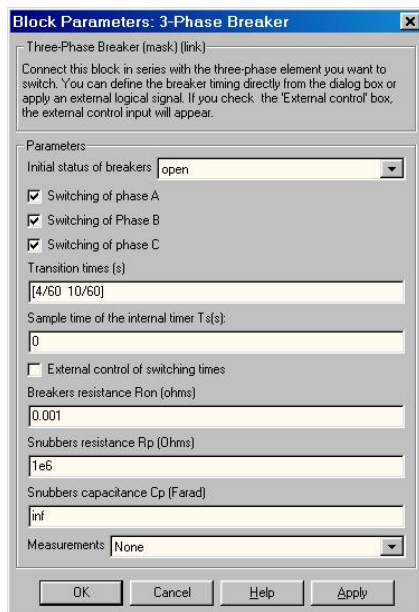


Рисунок 3.10 – Вікно завдання параметрів *Breaker*

Параметри блоку:

Initial status of breakers:

[Початковий стан ключів]. Значення параметра вибирається із списку:

- *open* - всі ключі відкриті
- *closed* - всі ключі закриті.

Switching of phase A:

[Керування ключем фази A]. При знятому прапорці керування ключем не проводиться. Стан ключа визначається параметром *Initial status of breakers*.

Switching of phase B:

[Керування ключем фази B]. При знятому прапорці керування ключем не проводиться. Стан ключа визначається параметром *Initial status of breakers*.

Switching of phase C:

[Керування ключем фази C]. При знятому прапорці керування ключем не проводиться. Стан ключа визначається параметром *Initial status of breakers*.

Transition times (s):

[Час спрацьовування вимикача]. Параметр задається у вигляді вектора, що визначає моменти часу спрацьовування вимикача.

Sample time of the internal timer T_s (s):

[Крок дискретизації вбудованого таймера].

External control of switching times:

[Зовнішнє керування часом спрацьовування]. При установці прапорця на піктограмі блоку з'являється вхідний керуючий порт. Одиничний рівень керуючого сигналу викликає замикання ключів, а нульовий рівень є командою на розмикання ключів, при цьому розрив ланцюга в кожній фазі виконується при досягненні струмом цієї фази нульового рівня.

Breaker resistance R_{on} (Ohm):

[Опір вимикача в замкнутому стані (Ом)].

Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed'):

[Початковий стан вимикача (0 - розімкнений, 1 - замкнутий)].

Snubber resistance R_s (Ohm):

[Опір іскрогасящей ланцюгу (Ом)].

Snubber capacitance C_s (F):

[Ємність іскрогасящого ланцюга (Ф)].

Measurements:

[Вимірювані змінні]. Значення параметра вибираються зі списку:

- *None* - немає змінних для відображення ;
- *Branch voltage Voltage*- напруга на затисках елемента;
- *Branch current* - струм елемента;
- *Branch voltage and current* - напруга і струм елемента.

Приклад 3.4.

На рис. 3.11 показана схема, з використанням трифазного вимикача. Керування вимикачем здійснюється за допомогою блоку *Timer*. Вимірювання фазних струмів виконується блоком *Multimetr*.

Приклад 3.5.

На рис. 3.12 показана схема, що забезпечує прямий пуск двигуна і подальша накидання навантаження. На малюнку приведені також графіки кутової швидкості валу і електромагнітного моменту, а також динамічна механічна характеристика.

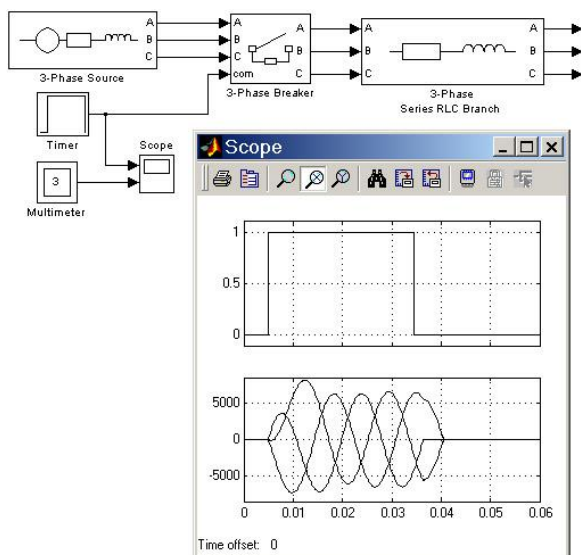


Рисунок 3.11 – Приклад використання трифазного перемикача змінного струму при моделюванні

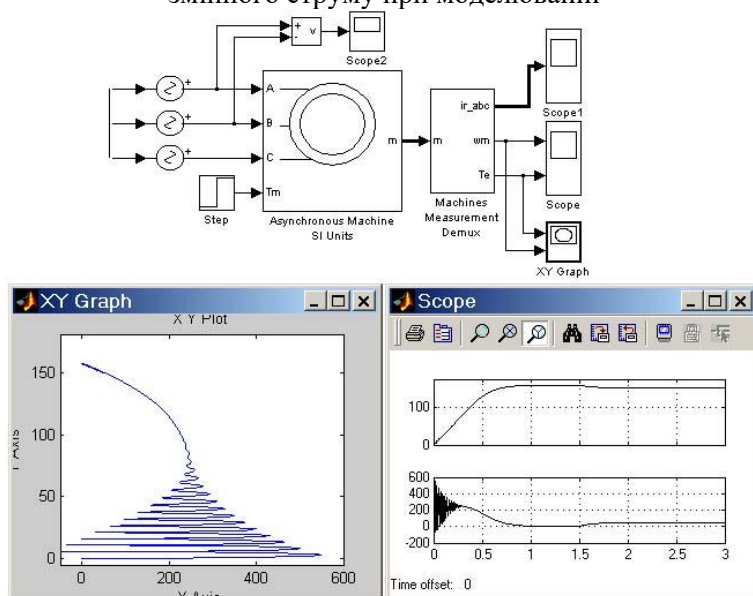


Рисунок 3.12 – Математична модель АД з КЗ ротором, механічна і динамічні характеристики зміни швидкості і моменту в часі

Приклад 3.6.

На рис. 3.13 показана схема, що забезпечує реостатний пуск двигуна в 3 резистивні ступені. На малюнку приведені також графіки зміни швидкості і електромагнітного моменту в часі.

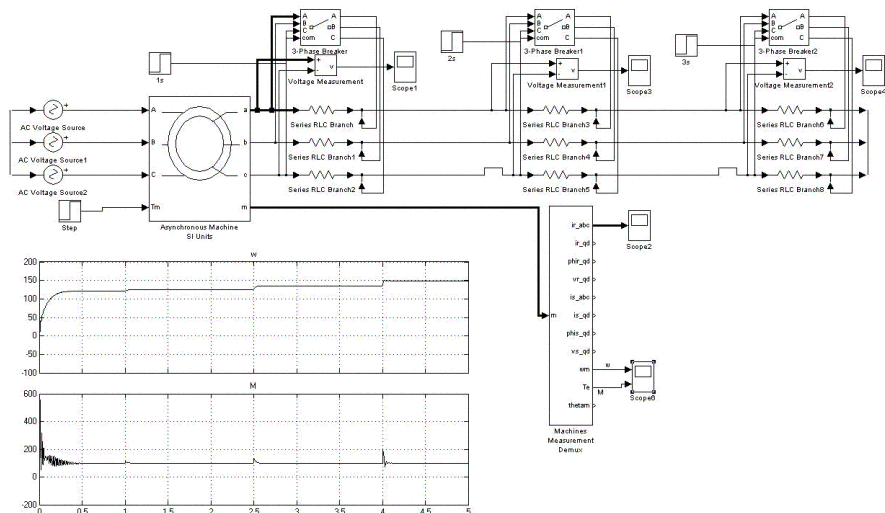


Рисунок 3.13 – Математична модель пуску АД з фазним ротором в 3 резистивні ступені, графіки зміни швидкості і електромагнітного моменту в часі

Загальні вказівки до виконання курсового проекту

Відповідно до варіанту завдання розрахувати вхідні параметри асинхронного електродвигуна необхідні для моделювання в середовищі MatLab і побудувати:

- математичну модель АД з короткозамкнутим ротором. На моделі отримати природну механічну і динамічні характеристики зміни швидкості і моменту в часі;
- математичну модель пуску АД з фазним ротором в 3 резистивні ступені. На моделі отримати графіки зміни швидкості і електромагнітного моменту в часі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко В. І., Крисан Ю. О. Основи електропривода: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. 402 с.
2. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. 660 с.
3. Загірняк М. В., Чорний О. П. Електричні машини та привод: підручник. Кременчук: КДПУ, 2008. 488 с.
4. Булгар В. В. Теорія електроприводу. Збірник задач: навч. посіб. Одеса: Поліграф, 2006. 408 с.
5. Константинов К. В. Системи керування електроприводами постійного струму: навч. посіб. Хабаровськ: Вид-во ДВГУПС, 2004. 90 с.
6. Мазуренко Л. І. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 352 с.
7. Колб Ант. А., Колб А. А. Теорія електроприводу: навч. посіб. Дніпропетровськ: НГУ, 2006. 511 с.
8. Електропривод та автоматизація: навч. посіб. / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. В. Козирський, В. Я. Бунько. Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2019. 619 с.
9. Шульга О. В. Автоматизоване керування електроприводами: навч. посіб. Полтава: ПолНТУ, 2007. 293 с.
10. Пересада С.М., Ковбаса С.М. Керування векторно-керованими асинхронними та синхронними електроприводами: підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 412 с.
11. Черних І. В. Моделювання електротехнічних пристроїв в MATLAB, SimPowerSystems і Simulink: навч. посіб. М: ДМК Прес, 2007. 288 с.
12. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основи застосування: повн. кер. користувача. М: СОЛОН-Прес, 2002. 768 с.
13. Дебні Дж., Харман Т. Simulink 4. Секрети майстерності: пер. з англ. М: Бином. Лабораторія знань, 2003. 403 с.
14. Schneider Electric: офіційний сайт компанії. URL: <https://www.se.com>.