

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Методичні вказівки та завдання
до виконання курсового проєкту
для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціалізації
«Електромеханічні системи автоматизації»

Київ 2025

УДК 31.261.3

ТЗЗ

Укладачі: Г.М. Голенков, канд. техн. наук, доцент;
Р.П. Бондар, д-р техн. наук, професор

Рецензент С. В. Іносов, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск Л.І. Мазуренко, д-р техн. наук,
професор, завідувач кафедри електротехніки та електроприводу.

*Затверджено на засіданні кафедри електротехніки та
електроприводу, протокол №10 від 30 квітня 2025 року.*

В авторській редакції.

Теорія електропривода [Електронний ресурс] : методичні
ТЗЗ вказівки та завдання до виконання курсового проєкту /уклад.:
Г. М. Голенков, Р. П.Бондар. – Київ : КНУБА, 2025. –27 с.

Розглянуто основні методи розрахунку автоматизованого
електроприводу механізму підйому з асинхронним двигуном.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціалізації «Електромеханічні системи
автоматизації».

© КНУБА, 2025

Загальні положення

На сучасному етапі розвитку промислового та цивільного будівництва широко впроваджуються комплексна механізація та автоматизація, в тому числі, різні системи автоматизованого електроприводу будівельних машин та механізмів. Автоматизація виробництва в основному здійснюється через використання електричного приводу, який має цілий ряд переваг порівняно з іншими видами приводів. Практика показує, що рівень і якість автоматизації, ефективність та культура виробництва, а також якість продукції значною мірою залежать від того, яку систему електроприводу в тому чи іншому випадку застосовано.

Метою виконання здобувачами практичних завдань згідно з нормами робочої навчальної програми під назвою “Автоматизований гідро-, пневмo- та електропривод” (Автоматизований електропривод) є підготовка висококваліфікованих спеціалістів для будівельної галузі народного господарства з глибокими знаннями з питань автоматизації будівництва, теорії й практики застосування електричних машин та електроприводу в сучасних технологіях. При цьому здобувачі повинні осмислити та вивчити теоретичні питання, опрацювати наукову літературу та провести моделювання за допомогою комп’ютерних технологій.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ КУРСОВОГО ПРОЄКТУ

на тему: *«Автоматизований електропривод механізму підйому з асинхронним двигуном»*

1. Розрахунок статичних навантажень і побудова діаграми навантажень роботи крана.
2. Визначення режиму роботи електроприводу механізму підйому крана.
3. Розрахунок необхідної потужності двигуна. Вибір двигуна за каталогом.
4. Перевірка перевантажувальної здатності вибраного двигуна.
5. Побудова природної механічної характеристики вибраного двигуна.
6. Розрахунок графоаналітичним методом електромеханічних перехідних процесів.
7. Розробка принципової схеми автоматичного управління електроприводом механізму підйому крана та монтажною схемою щита керування приводом підйому мостового крана.
8. Вибір апаратури захисту та керування.

Інші питання щодо виконання курсового проєкту:

1. Термін початку роботи - 5 тиждень.
2. Термін закінчення роботи - 18 тиждень.
3. Обсяг завдання - 14..20 сторінок формату А4.
4. Здобувачі виконують роботу відповідно до варіанта (табл. 1) згідно з двома останніми цифрами залікової книжки.
5. Під час виконання роботи для усіх варіантів: напруга $U=220$ В; частота мережі $f=50$ Гц; число фаз $m_f=3$.
6. Розрахунок робіт і креслення виконують відповідно до Держстандарту. Креслення схем електричної принципової автоматичного управління електроприводом механізму підйому крана та монтажної схеми щита керування виконати на аркуші формату А2.

Таблиця 1

Варіанти до розрахунку

№ вар.	Назви параметрів											
	Вантажність, т	Маса гайкової підвіски, т	Швидкість піднімання, м/с	Висота піднімання, м	Швидкість пересування мосту, м/с	Довжина пересування мосту, м	Швидкість пересування візка, м/с	Довжина пересування візка, м	Тривалість завантаження, с	Тривалість розвантаження, с	Радіус барабана, м	Кратність поліспаду
	$m_{\text{вант}}$	$m_{\text{г.п.}}$	$v_{\text{п}}$	$H_{\text{п}}$	$v_{\text{п.м}}$	$L_{\text{м}}$	$v_{\text{п.в}}$	$L_{\text{п.в}}$	t_3	t_p	$R_{\text{бар}}$	$i_{\text{п}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	5,0	0,5	0,8	12,0	0,6	20,0	0,8	30,0	60	45	0,2	1
2	7,5	0,65	0,6	12,0	0,6	18,0	0,8	25,0	80	48	0,25	1
3	10,0	0,8	0,5	12,0	0,6	18,0	0,8	30,0	62	50	0,25	2
4	12,5	1,0	0,6	10,0	0,5	15,0	0,7	25,0	62	52	0,3	2
5	15,0	1,2	0,5	8,0	0,5	15,0	0,7	30,0	63	54	0,3	2
6	20,0	1,3	0,5	12,0	0,4	12,0	0,6	25,0	63	45	0,4	3
7	30,0	2,0	0,4	10,0	0,4	12,0	0,6	30,0	68	48	0,4	3
8	40,0	2,12	0,4	8,0	0,3	10,0	0,5	25,0	68	50	0,5	4
9	50,0	2,5	0,3	10,0	0,3	10,0	0,4	30,0	59	54	0,5	4
10	60,0	3,0	0,3	12,0	0,2	8,0	0,3	25,0	90	80	0,6	4
11	3,5	0,5	0,7	8,0	0,4	6,0	0,5	20,0	60	50	0,2	1
12	4,0	0,5	0,75	9,0	0,5	7,0	0,6	25,0	60	48	0,2	1
13	4,5	0,5	0,8	10,0	0,6	8,0	0,7	25,0	60	45	0,2	1

Продовження табл. 1

14	5,5	0,55	0,7	11,0	0,5	11,0	0,8	25,0	90	70	0,25	1
15	6,0	0,6	0,6	11,0	0,5	11,0	0,7	30,0	90	75	0,25	1
16	6,5	0,65	0,6	11,0	0,5	12,0	0,7	30,0	90	80	0,25	1
17	7,0	0,65	0,6	12,0	0,5	12,0	0,7	25,0	90	70	0,25	1
18	8,0	0,7	0,5	10,0	0,5	14,0	0,8	30,0	84	65	0,25	2
19	8,5	0,7	0,5	10,0	0,5	14,0	0,8	30,0	84	68	0,25	2
20	9,0	0,7	0,5	10,0	0,5	14,0	0,8	30,0	84	70	0,25	2
21	9,5	0,7	0,5	12,0	0,5	14,0	0,8	30,0	74	60	0,25	2
22	11,0	1,0	0,5	12,0	0,4	16,0	0,8	25,0	74	62	0,3	2
23	12,0	1,0	0,4	12,0	0,4	16,0	0,8	25,0	74	60	0,35	2
24	13,0	1,0	0,5	8,0	0,4	16,0	0,8	25,0	74	65	0,4	2
25	14,0	1,2	0,5	12,0	0,4	12,0	0,6	30,0	73	60	0,4	2
26	16,0	1,2	0,4	10,0	0,3	12,0	0,6	30,0	73	60	0,45	3
27	17,0	1,2	0,4	8,0	0,3	12,0	0,6	30,0	73	55	0,5	3
28	18,0	1,3	0,4	10,0	0,3	12,0	0,6	30,0	73	55	0,5	3
29	19,0	1,3	0,4	10,0	0,3	14,0	0,5	25,0	72	60	0,3	3
30	21,0	1,3	0,4	10,0	0,3	14,0	0,5	25,0	72	55	0,3	3
31	22,0	1,3	0,4	10,0	0,3	14,0	0,5	25,0	62	45	0,3	3
32	23,0	1,3	0,4	10,0	0,3	14,0	0,5	25,0	62	50	0,3	3
33	24,0	1,3	0,4	10,0	0,3	14,0	0,5	25,0	62	45	0,3	3
34	25,0	1,8	0,4	10,0	0,2	14,0	0,5	25,0	62	50	0,3	3
35	26,0	1,8	0,4	10,0	0,2	14,0	0,5	25,0	62	45	0,3	3
36	27,0	1,8	0,4	12,0	0,2	14,0	0,5	25,0	62	48	0,4	3
37	28,0	2,0	0,4	12,0	0,2	14,0	0,5	25,0	62	52	0,4	3
38	29,0	2,0	0,4	12,0	0,2	10,0	0,5	25,0	62	50	0,4	3
39	31,0	2,0	0,4	12,0	0,2	10,0	0,5	25,0	62	48	0,4	4
40	32,0	2,0	0,4	12,0	0,2	10,0	0,5	30,0	62	46	0,4	4
41	33,0	2,0	0,3	12,0	0,3	10,0	0,5	30,0	68	45	0,4	4
42	34,0	2,0	0,3	12,0	0,3	10,0	0,5	30,0	64	46	0,4	4
43	35,0	2,1	0,3	12,0	0,3	10,0	0,4	30,0	64	48	0,4	4
44	36,0	2,2	0,3	12,0	0,3	10,0	0,4	30,0	64	50	0,4	4
45	37,0	2,2	0,3	8,0	0,3	8,0	0,4	30,0	64	52	0,4	4
46	38,0	2,2	0,3	8,0	0,3	8,0	0,4	30,0	64	48	0,4	4
47	45,0	2,12	0,4	8,0	0,3	10,0	0,5	25,0	68	48	0,5	4
48	55,0	2,5	0,3	10,0	0,3	10,0	0,4	30,0	59	39	0,5	4
49	62,0	3,0	0,3	12,0	0,2	8,0	0,3	25,0	90	70	0,6	4
50	5,5	0,3	0,9	10,0	0,7	18,0	0,6	20,0	70	50	0,2	1
51	8,5	0,6	0,6	10,0	0,7	16,0	0,6	18,0	82	50	0,25	2
52	11,0	0,7	0,5	10,0	0,5	20,0	0,5	30,0	68	56	0,25	2
53	14,5	1,1	0,6	15,0	0,4	20,0	0,5	26,0	64	54	0,3	2

54	17,0	1,3	0,5	9,0	0,4	18,0	0,6	24,0	60	58	0,3	3
55	22,5	1,2	0,5	14,0	0,3	14,0	0,5	16,0	68	48	0,4	3
56	34,0	1,9	0,3	11,0	0,3	18,0	0,3	30,0	70	43	0,4	4
57	43,0	2,0	0,4	10,0	0,3	10,0	0,3	28,0	70	52	0,5	4
58	52,5	2,7	0,3	12,0	0,2	8,0	0,3	24,0	60	60	0,5	4
59	57,5	2,9	0,3	15,0	0,2	10,0	0,4	18,0	88	80	0,6	4
60	3,0	0,4	0,7	9,0	0,7	8,0	0,8	30,0	68	55	0,2	1
61	4,6	0,45	0,75	10,0	0,8	10,0	0,8	30,0	62	46	0,2	1
62	4,8	0,5	0,8	8,0	0,6	10,0	0,8	28,0	66	52	0,2	1
63	6,2	0,6	0,7	10,0	0,6	12,0	0,6	18,0	92	80	0,25	1
64	6,5	0,6	0,9	15,0	0,7	12,0	0,6	10,0	88	78	0,25	1
65	7,0	0,7	0,6	12,0	0,7	14,0	0,6	30,0	80	90	0,25	1
66	9,0	0,7	0,6	10,0	0,6	14,0	0,6	28,0	86	70	0,25	2
67	10,5	0,8	0,3	16,0	0,5	10,0	0,4	22,0	83	67	0,25	2
68	14,5	0,8	0,3	12,0	0,4	10,0	0,4	18,0	90	72	0,25	2
69	18,0	0,9	0,3	9,0	0,4	8,0	0,4	22,0	79	68	0,25	3
70	20,5	1,1	0,3	10,0	0,3	8,0	0,4	26,0	70	65	0,25	3

Загальні вказівки

1. Крани мостового типу призначено в основному для обслуговування прямокутних майданчиків. Найбільш розповсюдженими є крани мостового типу: мостові, козлові, мостові перевантажувальні, кабельні і мостокабельні. На рис.1 зображено приклад зовнішнього вигляду двобалкового мостового крану.

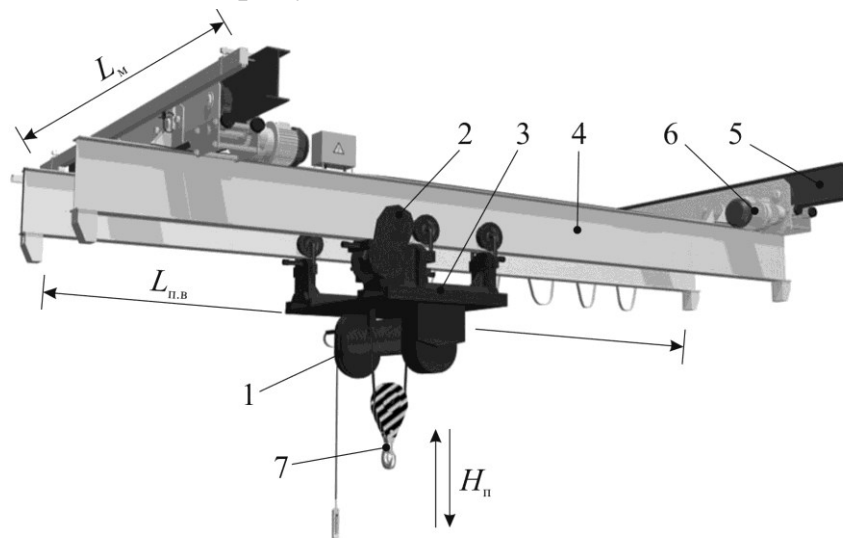


Рис. 1. Схематичне зображення мостового крану загального призначення: 1 – механізм піднімання; 2 – механізм пересування; 3 – вантажний візок; 4 – балка; 5 – рейки; 6 – механізм пересування моста; 7 – гакова підвіска

2. Для передачі крутного моменту від двигуна до барабана з тросом використовуються багатоступеневі редуктори. На рис. 2 наведено приклад кінематичні схеми механізму підйому крану.

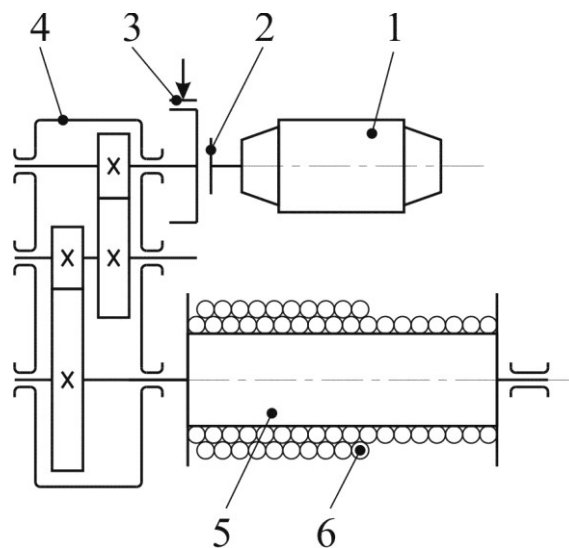


Рис. 2. Схема механізму для піднімання вантажу з електричним приводом:
1 – двигун; 2 – муфта з'єднуючого валу; 3 – гальма; 4 – двоступеневий редуктор;
5 – барабан; 6 – трос

3. В якості приводних двигунів для механізмів піднімання загального призначення зазвичай використовують асинхронні двигуни трифазного струму; в якості гальмівних пристроїв – нормально замкнуті електрогідравлічні або електромагнітні гальма з пружинним замикачем; в якості передачі – циліндричні або триступінчаті редуктори.

Існують схеми отримання малих швидкостей опускання вантажів в межах 20..30 % від основної шляхом автоматичного підгальмовування вала двигуна; електричного управління двигуном гідроштовхача; застосування «вихрових» електродинамічних або електромагнітних порошкових гальм.

Об'єкти будівельного виробництва, як і машини, використовувані на його підприємствах та будівельних майданчиках, живляться трифазним змінним струмом з частотою $f=50$ Гц, напругою $U=380$ В.

4. Для більшості будівельних кранів застосовують електропривод з асинхронними двигунами з фазовим ротором. У зв'язку з важкими експлуатаційними умовами кранового електричного устаткування використовують спеціальні кранові двигуни закритого виконання типу МТ та МТК (змінного струму) з тривалістю вмикання $TВ=25\%$ та 40% і потужністю 3,0..100 кВт. Технічні характеристики деяких асинхронних двигунів з фазовим ротором наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики двигунів з фазовим ротором серії МТН,
МТМ, МТО, МТ і МТВ

Тип двигуна	Назви параметрів									
	Потужність, кВт	Частота обертання валу, об/хв	Струм статора, А	Коефіцієнт потужності	ККД	Струм ротора, А	Напруга ротора, В	Максимальний момент, Н·м	Маховий момент, кгм ²	Маса двигуна, кг
	$P_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$I_{\text{ст}}$	$\cos\varphi$	η	$I_{\text{рот}}$	$U_{\text{рот}}$	M_{max}	$J_{\text{д}}$	$m_{\text{д}}$
При ТВ%=40%										
МТМ111-6	2,2	885	6,6	0,76	63,0	11,1	144	54,6	0,0487	76
МТН111-6	3,0	895	10,5	0,67	65,0	13,2	176	83	0,19	76
МТН112-6	4,5	910	13,9	0,71	69,0	15,6	203	118	0,27	88
МТН211-6	7,0	920	22,5	0,64	73,0	19,5	236	196	0,46	120
МТН311-6	11,0	940	31,5	0,69	78,0	42,0	172	314	0,90	170
МТН312-6	15,0	950	38,5	0,73	81,0	46,0	219	471	1,25	210
МТН411-6	22,0	960	55,5	0,73	82,5	60,0	235	638	2,00	280
МТН412-6	30,0	965	76,0	0,71	84,5	73,0	255	932	2,70	345
МТН512-6	55,0	960	120,0	0,79	88,0	105,0	340	1630	4,10	520
МТН611-6	75,0	950	154,0	0,85	87,0	180,0	270	2610	13,10	810
МТН612-6	95,0	960	193,0	0,85	88,0	176,0	366	3580	16,50	930
МТН613-6	118,0	960	237,0	0,84	90,0	160,0	473	4660	20,40	1100
МТН311-8	7,5	690	23,4	0,68	71,5	21,0	245	265	1,10	170
МТН312-8	11,0	700	31,0	0,69	78,0	43,0	165	422	1,25	210
МТН411-8	15,0	705	43,0	0,67	79,0	48,8	206	569	2,15	280
МТН412-8	22,0	715	66,0	0,63	80,5	57,0	248	883	3,00	345
МТН511-8	28,0	705	71,0	0,72	83,0	64,0	281	1000	4,30	470
МТН512-8	37,0	705	89,0	0,74	85,0	77,0	305	1370	5,70	570
МТН611-10	45,0	570	112,0	0,72	84,0	154,0	185	2320	17,00	900
МТН612-10	60,0	565	147,0	0,78	85,0	154,0	248	3140	21,00	1070
МТН613-10	75,0	575	180,0	0,72	88,0	145,0	320	4120	25,00	1240
МТН711-10	100,0	584	246,0	0,69	89,5	233,0	272	4560	41,00	1550
МТН712-10	125,0	585	300,0	0,70	90,3	237,0	327	5690	51,00	1700
МТН713-10	160,0	586	392,0	0,68	91,0	244,0	408	7310	60,00	1900

При ТВ%=25%										
МТО11-6	1,4	885	5,3	0,65	62,0	9,3	112	34,73	0,0212	51
МТ-11-6	2,2	885	7,2	0,72	65,0	12,8	135	54,6	0,0425	90
МТ-12-6	3,5	910	10,3	0,73	69,0	12,2	204	91,82	0,0675	109
МТ-21-6	5,0	940	14,9	0,68	71,0	14,9	164	147,3	0,1025	145
МТ-22-6	7,5	945	20,9	0,69	73,0	21,6	227	212,2	0,1420	163
МТ-31-6	11,0	953	28,4	0,71	78,0	35,4	200	341,7	0,2620	218
МТВ312-6	16,0	955	37,6	0,77	80,0	49,5	208	448,0	0,3130	210
МТВ411-6	22,0	965	55,0	0,71	82,0	61,0	225	607,6	0,5000	280
МТВ412-6	30,0	970	70,5	0,73	84,0	72,0	259	827,3	0,6750	345

5. Поліспаст – система, яка складається з рухомих та нерухомих блоків і використовується для зменшення зусилля, що розвивається лебідкою; зміни напрямку зусилля, яке прикладається до вантажу; зменшення швидкості підйому вантажу у порівнянні зі швидкістю намотування тросу на барабан лебідки. Приклади схем поліспастів зображено на рис. 3.

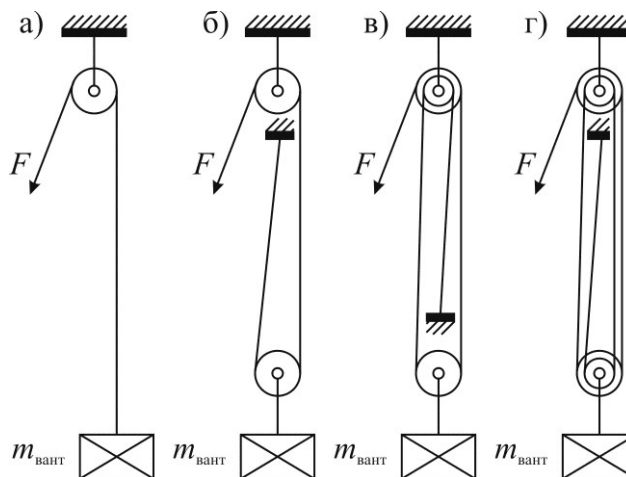


Рис. 3. Схеми поліспастів:

а – $i_{п}=1$, б – $i_{п}=2$, в – $i_{п}=3$, г – $i_{п}=4$.

Хід виконання розрахунків

1. Обрати вхідні дані відповідно до варіанту завдання (див. табл. 1). Охарактеризувати специфічні особливості і характеристики електроприводу, визначити основні вимоги, які ставлять до електроприводу (межі і потрібна плавність регулювання, вид опорів, природна та штучні механічні характеристики з необхідною жорсткістю, які відповідають режимам роботи приводу, умови пуску й гальмування тощо).

2. Визначити статичні навантаження на валу двигуна

Тягове зусилля механізму підйому описується виразом:

$$F = (m_{\text{вант.}} + m_{\text{Г.П.}}) \cdot g, \text{ Н}, \quad (1)$$

де $m_{\text{вант.}}$ – маса вантажу, кг; $m_{\text{Г.П.}}$ – маса гакової підвіски, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Потужність двигуна механізму підйому при тривалому режимі роботи ($TB\%=100\%$) попередньо розраховується за формулою:

$$P = \frac{F \cdot v_n}{1000}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

де v_n – швидкість піднімання вантажу, м/с.

Електродвигуни для будівельних кранів випускають з відносною малою частотою обертання (див. табл. 2). Для попереднього визначення частоти обертання магнітного поля n_1 та кількості пар полюсів p використовують наступні залежності:

$$P=45..160 \text{ кВт} \rightarrow n_1=600 \text{ об/хв} \rightarrow \omega_1=62,8 \text{ рад/с}, p=5;$$

$$P=7,5..45 \text{ кВт} \rightarrow n_1=750 \text{ об/хв} \rightarrow \omega_1=78,5 \text{ рад/с}, p=4;$$

$$P=1,4..118 \text{ кВт} \rightarrow n_1=1000 \text{ об/хв} \rightarrow \omega_1=104,7 \text{ рад/с}, p=3.$$

Статичні навантаження на валу двигуна розраховуються за наведеними нижче формулами:

$$M_{\text{бар}} = \frac{F \cdot R_{\text{бар}}}{i_n}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3)$$

де $R_{\text{бар}}$ – радіус барабана, м; i_n – кратність поліспасти.

- при підніманні:

$$M_{\text{вант.п.}} = \frac{M_{\text{бар}}}{i \cdot \eta_{\text{вант.}}}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (4)$$

$$M_{\text{з.н.п.}} = \frac{m_{\text{Г.П.}} \cdot g \cdot R_{\text{бар}}}{i \cdot \eta_0 \cdot i_n}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (5)$$

- при опусканні:

$$M_{\text{вант.о.}} = \frac{M_{\text{бар}}}{i}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (6)$$

$$M_{\text{з.н.о.}} = \frac{m_{\text{Г.П.}} \cdot g \cdot R_{\text{бар}}}{i \cdot i_n}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (7)$$

де $i=\omega_1/\omega_{\text{бар}}$ – передавальне число редуктора; ω_1 – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с; $\omega_{\text{бар}}=v_n \cdot i_n/R_{\text{бар}}$ – кутова швидкість барабана, рад/с; $\eta_{\text{вант.}}=0,85$ – ККД механізму з повним (номінальним)

навантаженням; $\eta_0=0,5$ – ККД механізму без навантаження; $M_{бар}$ – момент опору на валу барабана, Н·м; $M_{вант.п.}, M_{з.п.п.}, M_{вант.о.}, M_{з.п.о.}$ – статичні моменти опору на валу двигуна під час піднімання та опускання відповідно з повним (номінальним) навантаженням і без нього, Н·м.

3. Побудувати циклограму механізму підйому мостового крану

Побудувати точну навантажувальну діаграму механізмів мостового крана дуже важко, оскільки в умовах будівельної індустрії кран виконує нарізноматніші операції. Тому з достатнім ступенем точності користуються зразковим (розрахунковим) спрощеним циклом роботи крана. Наприклад, вважають, що механізм піднімання виконує чотири робочі операції – піднімання, опускання номінального вантажу, піднімання, опускання гакової підвіски, а привід пересування – дві (одночасний рух мосту та візка до місця завантаження і розвантаження).

Розрахункова тривалість робочих операцій механізмів:

- час піднімання (опускання) гакової підвіски з вантажем або без нього:

$$t_{нід} = H_n / v_n, \text{ с}; \quad (8)$$

- час пересування мосту:

$$t_{мост} = L_m / v_{н.м}, \text{ с}; \quad (9)$$

- час пересування візка:

$$t_{візок} = L_{н.в} / v_{н.в}, \text{ с}. \quad (10)$$

Значення $t_{пауза}$, обирається, як найбільше серед тривалості пересування мосту або візка (найбільше або $t_{мост}$, або $t_{візок}$).

Вважаючи, що $t_{нід} = t_{спуск}$, можна побудувати циклограму роботи механізму підйому мостового крану (рис.4).

Тривалість робочих операцій механізму підйому крану визначається наступним виразом:

$$\sum t_{роб} = 2(t_{нід} + t_{спуск}), \text{ с}; \quad (11)$$

а час, коли механізм підйому не виконує роботи:

$$\sum t_n = t_z + t_p + 2t_{пауза}, \text{ с}. \quad (12)$$

Таким чином, середнє значення тривалості вмикання електроприводу розраховується за формулою:

$$TB\% = \frac{\sum t_{роб}}{\sum t_{роб} + \sum t_n} \cdot 100\%. \quad (13)$$

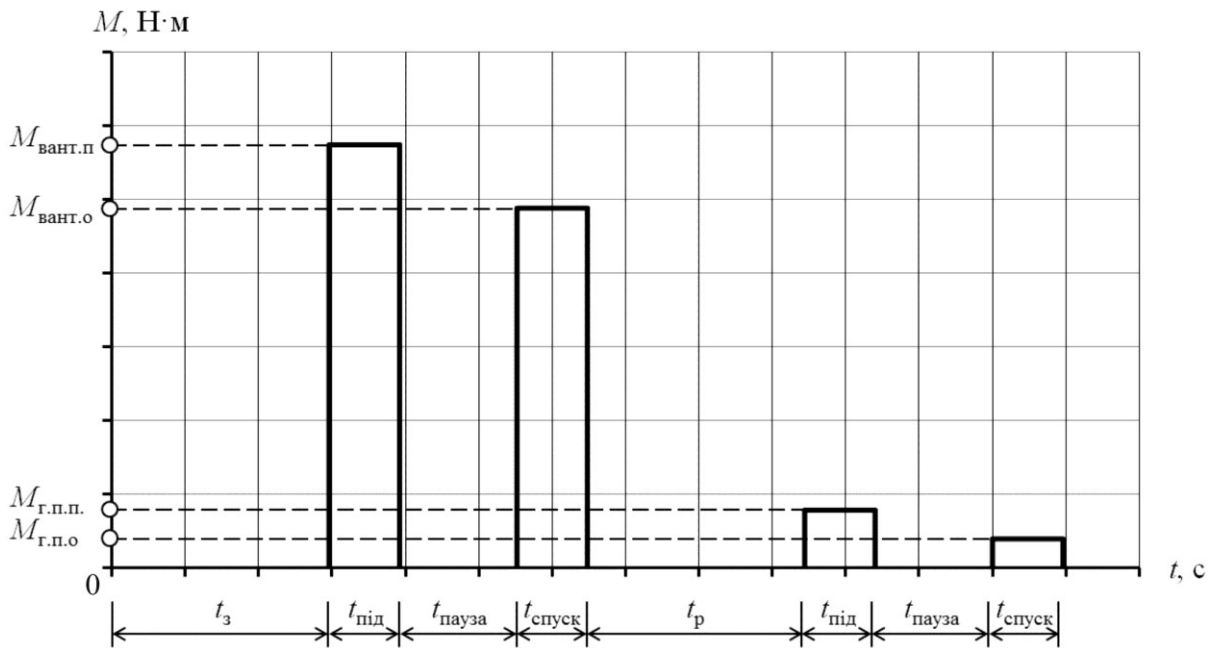


Рис.4. Циклограма роботи механізму підйому мостового крану

Необхідно звернути увагу на тривалість цикла, тобто час від початку найбільш важкої робочої операції до початку наступної робочої операції, який не має перевищувати 600 с.

4. Визначити потрібну потужність двигуна

Для приводу піднімальної лебідки крану визначають статичний момент:

$$M_{ст.} = \sqrt{\frac{M_{вант.п}^2 + M_{з.п.п.}^2 + M_{вант.о}^2 + M_{з.п.о}^2}{4}}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (14)$$

та попередньо визначають необхідну потужність двигуна

$$P_{розр.} = M_{ст.} \cdot \omega_1 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}. \quad (15)$$

Потужність двигуна, зведену до стандартних значень ПВ% визначаємо так:

$$P_{кат} = P_{розр.} \cdot \sqrt{\frac{ТВ\%_{розр.}}{ТВ\%_{кат}}}, \quad (16)$$

де $P_{кат}$ – потужність двигуна, обраного з каталогу, кВт; $P_{розр.}$ – розрахункова потужність двигуна, кВт; $ТВ\%_{розр.}$ – розрахункова ТВ% проектованого електроприводу; $ТВ\%_{кат}$ – стандартна ТВ%, яка може бути 15%, 25%, 40%, 60% і 100%.

За каталогом, взявши стандартну ТВ% (для механізму піднімання крану рекомендується вибрати $ТВ\%_{кат}=40\%$), вибирають двигун найближчої потужності у відношенні до $P_{кат}$ (див. табл.2).

5. Перевірити обраний двигун на перевантажувальну здатність та побудувати навантажувальну діаграму механізму підйому крану

Зведений до валу двигуна момент інерції всієї механічної частини електроприводу визначається за формулою:

$$J_{зв} = J_{\delta} + 0,15 \cdot J_{\delta} + \frac{m \cdot v_n^2}{\omega_{ном}^2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (17)$$

де J_{δ} – момент інерції ротора двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $0,15 \cdot J_{\delta}$ – момент інерції передавального механізму, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $m = m_{вант} + m_{г.п.}$ – маса поступально рухомих частин механізму, разом з масою вантажу, кг ; v_n – швидкість піднімання (опускання) або пересування, м/с ; $\omega_{ном}$ – номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{ном} = \frac{n_{ном}}{9,55}, \text{ рад/с}. \quad (18)$$

Тривалість пуску та гальмування двигуна:

$$t_{пуск} = J_{зв} \frac{\omega_{ном}}{(1,5 \div 1,8) \cdot M_{ном} - M_{ст}}, \text{ с}; \quad (19)$$

$$t_{гальм} = 0,8 \cdot t_{пуск}, \text{ с}; \quad (20)$$

де $M_{ст}$ – статичний момент опору (див. п. 4) при номінальному навантаженні ($\text{Н} \cdot \text{м}$); $M_{ном}$ – номінальний момент обраного двигуна:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (21)$$

Довжина шляху, пройденого протягом часу пуску (гальмування):

$$l_{пуск} = \frac{v_n \cdot t_{пуск}}{2}, \text{ м}; \quad (22)$$

$$l_{гальм} = \frac{v_n \cdot t_{гальм}}{2}, \text{ м}. \quad (23)$$

Тривалість руху (роботи електроприводу) в усталеному режимі:

$$t_{уст} = \frac{H_n}{v_n} - t_{пуск} - t_{гальм}, \text{ с}, \quad (24)$$

де H_n – висота піднімання вантажу, м ; v_n – швидкість піднімання, м/с .

Динамічний момент двигуна в період його пуску й гальмування:

$$M_{дин.пуск} = J_{зв} \frac{\omega_{ном}}{t_{пуск}}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (25)$$

$$M_{дин.гальм.} = J_{зв} \frac{\omega_{ном}}{t_{гальм.}}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (26)$$

Враховуючи, що відповідно до основного рівняння руху електроприводу, пусковий момент буде:

$$M_{пуск} = M_{ст} + M_{дин.пуск}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (27)$$

можна побудувати навантажувальну діаграму механізму підйому (рис.5).

Еквівалентний момент визначається за формулою:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_{пуск}^2 \cdot t_{пуск} + M_{ст}^2 \cdot t_{уст}}{\alpha \cdot t_{пуск} + t_{уст}}} \cdot \sqrt{\frac{ТВ\%_{розр}}{ТВ\%_{кат}}}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (28)$$

де $\alpha=0,75$ – коефіцієнт, який враховує погіршення охолодження в період пуску (гальмування) двигуна.

Перевірити виконання умови

$$M_{екв} \leq M_{ном}. \quad (29)$$

При не виконанні цієї умови з каталогу обрати наступний двигун більшої потужності і знову повторити розрахунок, починаючи з п.5. При виконанні цієї умови, $M_{екв}$ має бути меншим ніж $M_{ном}$ на 10..20%. Інакше обраний двигун буде значно недовикористовуватися. В цьому випадку необхідно обрати з каталогу інший двигун меншої потужності і повторити розрахунок з п.5.

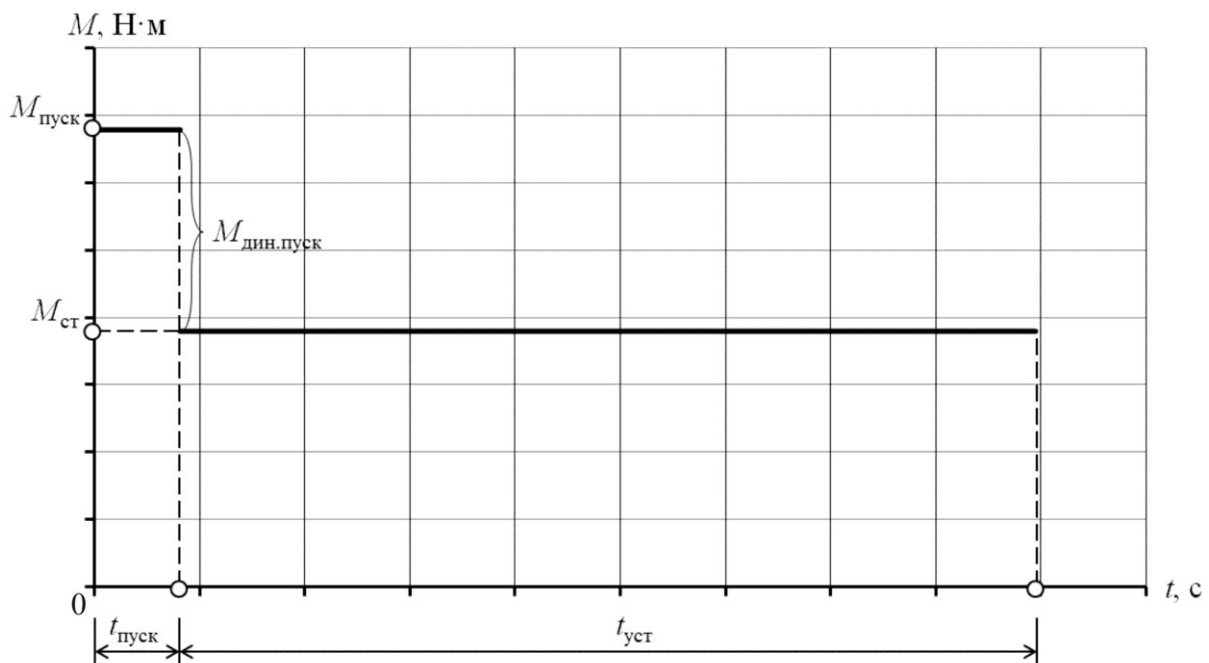


Рис. 5. Навантажувальна діаграма механізму підйому

Перевірити обраний двигун на перевантажувальну спроможність і забезпечення пускового режиму, тобто перевірити виконання умови:

$$M_{\max} \geq 1,2M_{\text{пуск}} \quad (30)$$

При невиконанні цієї умови обрати наступний двигун більшої потужності з каталогу і повторити розрахунок з п.5.

6. Побудувати природну механічну характеристику

Для розрахунку параметрів механічної природної характеристики асинхронних двигунів з фазовим ротором використовуються формули:

- частота обертання магнітного поля:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}, \text{ об/хв}; \quad (31)$$

- номінальне ковзання:

$$S_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1}; \quad (32)$$

- момент на валу двигуна:

$$M = \frac{2M_{\max}}{S_k/S + S/S_k}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (33)$$

- критичне ковзання:

$$S_k = S_{\text{ном}} \left[\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \right)^2 - 1} \right]; \quad (34)$$

Для побудови механічної характеристики $M=f(\omega)$ (ω – кутова швидкість обертання валу двигуна) її параметри розраховуються для значень ковзання S від 1 до 0,01 з врахуванням S_k та $S_{\text{ном}}$ (10..20 розрахунків) і записуються в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри механічної характеристики асинхронного двигуна з фазовим ротором

S	1,0	0,95	0,9	S_k	...	$S_{\text{ном}}$	0,01
S_k/S											
S/S_k											
$S_k/S + S/S_k$											
M											
$\omega = \omega_1(1-S)$											

Пікові моменти визначаються за формулами:

$$M_1 = 0,8M_{\max}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (35)$$

$$M_2 = (1,1..1,2)M_{\text{ном}}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (36)$$

Після проведених розрахунків, будується природня механічна характеристика (рис. 6) та відкладаються точки a та b , які знаходяться (відповідно) на перетині кривої моменту $M=f(\omega)$ і вертикальних прямих від точок M_1 та M_2 . А на перетині прямої, яка проходить через зазначені точки, з горизонтальною прямою, яка виходить з точки ω_1 , знаходиться точка K .

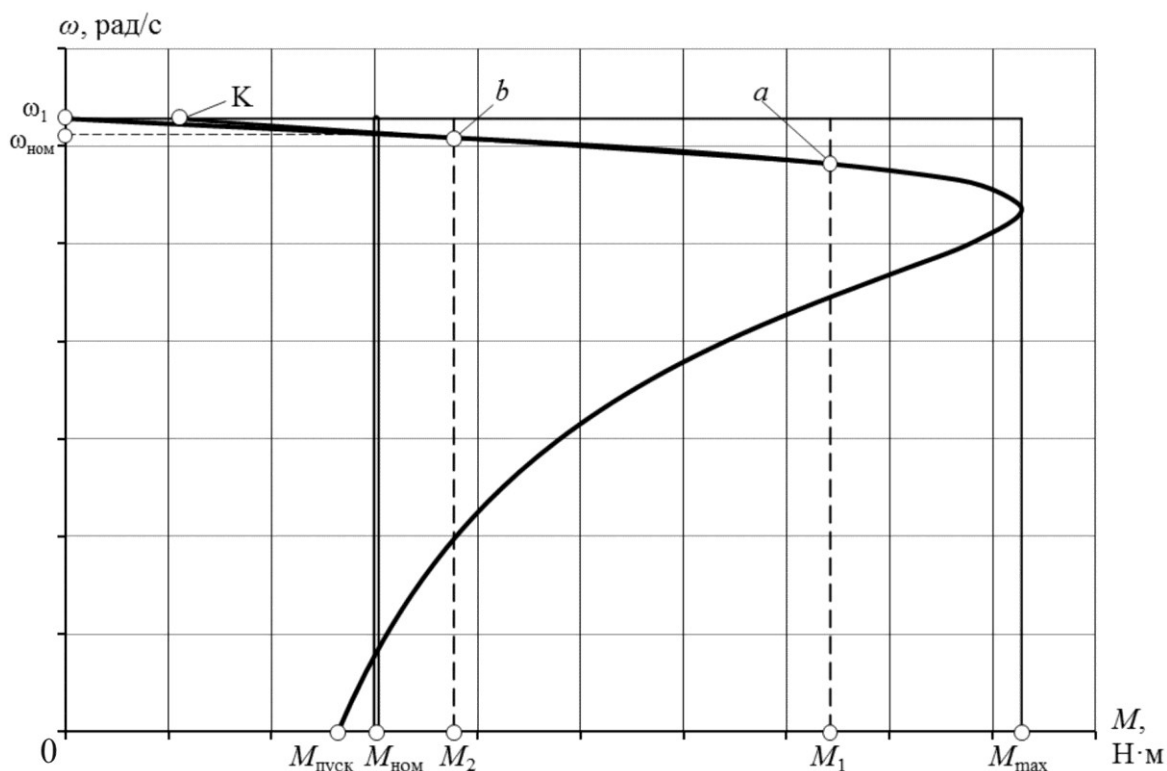


Рис.6 Механічна природня характеристика $M=f(\omega)$

7. Розрахунок значень пускових опорів у колі фазного ротору асинхронного двигуна графоаналітичним методом

Для розрахунку значень опорів графоаналітичним методом, спочатку відкладається пряма, що проходить через точки K і M_1 (рис.7). Перетин вказаної прямої з вертикальною прямою, що виходить з точки M_2 вкаже на розташування точки x , проекція якої на вісь 0ω відповідає швидкості ω_{13} обертання валу двигуна на третій ступені. А перетин горизонтальної прямої, що проходить через точку x , з вертикальною прямою, яка проходить через точку M_1 , визначає розташування точки x' .

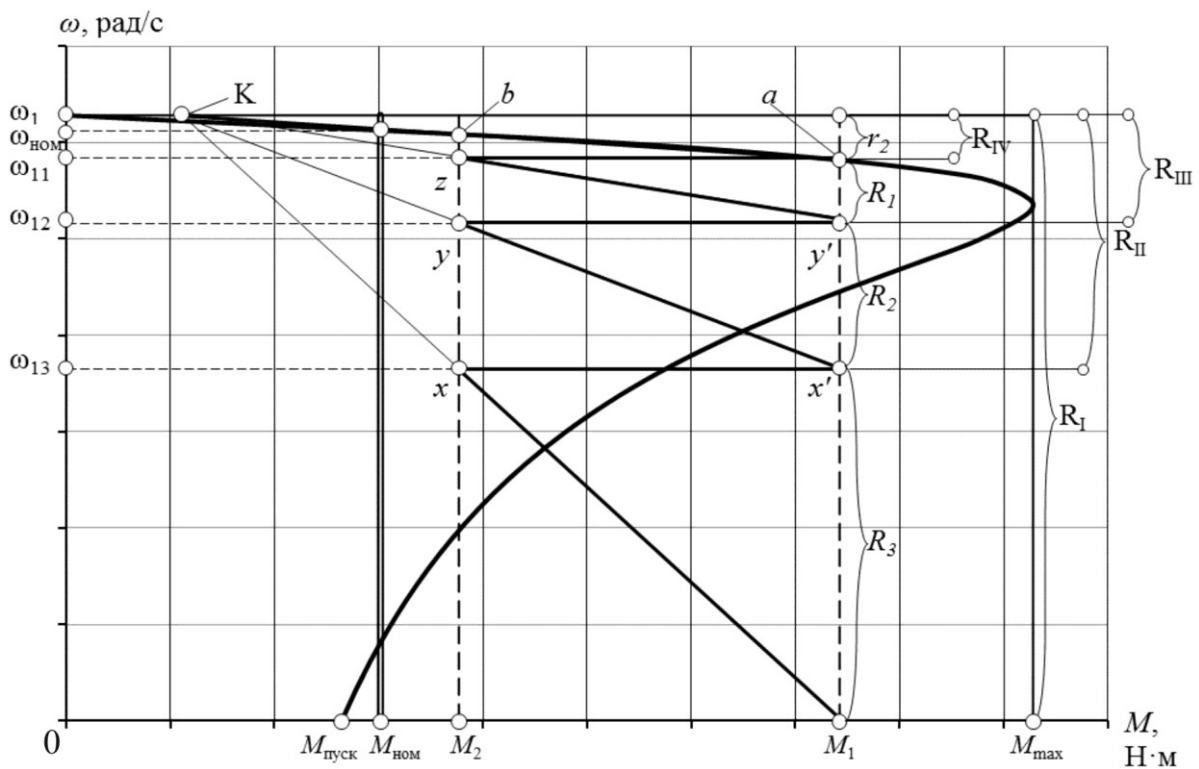


Рис.7. Характеристики до розрахунку опорів асинхронного двигуна з фазовим ротором графоаналітичним методом

Далі необхідно побудувати пряму Kx' , перетин якої з вертикальною прямою, що виходить з точки M_2 , вкаже на точку y . Проекція точки y на вісь $\theta\omega$ визначить швидкість ω_{12} на другій ступені. Схожим чином визначається швидкість ω_{11} обертання валу двигуна на першій ступені.

Слід зауважити, що горизонтальна пряма, яка вийде з точки z , має з достатнім ступенем точності пройти через область точки a . При невиканні цієї умови слід розрахувати нове значення пікового моменту M_2 , використавши інше значення коефіцієнту (ф. 36), і побудувати механічну характеристику (див. рис. 6), врахувавши нове значення M_2 .

Опір обмотки ротора визначається за формулою:

$$r_2 = \frac{U_{\text{рот}} \cdot S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{рот}}}, \text{ Ом.} \quad (37)$$

Опори секцій розраховуються за допомогою наступних виразів:

$$R_1 = j(\omega_{11} - \omega_{12}), \text{ Ом;} \quad (38)$$

$$R_2 = j(\omega_{12} - \omega_{13}), \text{ Ом;} \quad (39)$$

$$R_3 = j(\omega_{13} - \omega_{00}), \text{ Ом,} \quad (40)$$

де

$$j = \frac{r_2}{\omega_1 - \omega_{11}}. \quad (41)$$

Опори ступенів визначаються виразами:

$$R_I = r_2 + R_1 + R_2 + R_3, \text{ Ом}; \quad (42)$$

$$R_{II} = r_2 + R_1 + R_2, \text{ Ом}; \quad (43)$$

$$R_{III} = r_2 + R_1, \text{ Ом}; \quad (44)$$

$$R_{IV} = r_2, \text{ Ом}. \quad (45)$$

8. Розрахунок механічних перехідних процесів та побудова їх графіків

Тривалість витримки на кожній пусковій механічній характеристиці:

$$t_{Mi} = T_{Mi} \ln \frac{M_1 - M_{cm}}{M_2 - M_{cm}}, \text{ с}, \quad (46)$$

де $T_{Mi} = J_{\text{зв}} \frac{R_i}{K_a^2}$ – стала часу механічного перехідного процесу на i -

характеристиці, с; $K_a = \frac{M_{\text{ном}}}{\sqrt{3}I_{\text{ром}}}$ – коефіцієнт пропорційності асинхронного

двигуна; R_i – опори ступенів i -характеристики, Ом.

У загальному випадку рівняння перехідних процесів мають вигляд:

$$M = M_1 \cdot e^{-t_M/T_M} + M_{cm} \left(1 - e^{-t_M/T_M} \right), \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (47)$$

$$\omega = \omega_{\text{поч}} \cdot e^{-t_M/T_M} + \omega_{\text{кін}} \left(1 - e^{-t_M/T_M} \right), \text{ рад/с}, \quad (48)$$

де $\omega_{\text{поч}}$ – початкове значення кутової швидкості обертання валу двигуна на i -характеристиці, рад/с; $\omega_{\text{кін}}$ – кінцеве значення швидкості на i -характеристиці, рад/с. Наприклад, для третьої ступені $\omega_{\text{поч}}=0$, а $\omega_{\text{кін}}=\omega_{13}$; для другої – $\omega_{\text{поч}}=\omega_{13(P)}$ (значення швидкості, що отримано цим розрахунком), $\omega_{\text{кін}}=\omega_{12}$; першої – $\omega_{\text{поч}}=\omega_{12(P)}$, $\omega_{\text{кін}}=\omega_{11}$; ступені без пускових опорів – $\omega_{\text{поч}}=\omega_{11(P)}$, $\omega_{\text{кін}}=\omega_{\text{ном}}$.

Результати розрахунків параметрів перехідних процесів для кожної ступені заносяться у табл.4 (10..20 розрахунків з однаковим кроком зміни Δt_{Mi} часу перехідного процесу t_{Mi}).

Параметри механічного переходного процесу

t_M	0	Δt_M	$2\Delta t_M$	$3\Delta t_M$	$4\Delta t_M$	t_M
t_M/T_M											
e^{-t_M/T_M}											
M											
ω											

Після розрахунків необхідно побудувати графіки переходних процесів для моменту $M=f(t)$ та кутової швидкості $\omega=f(t)$ обертання валу двигуна (рис. 8).

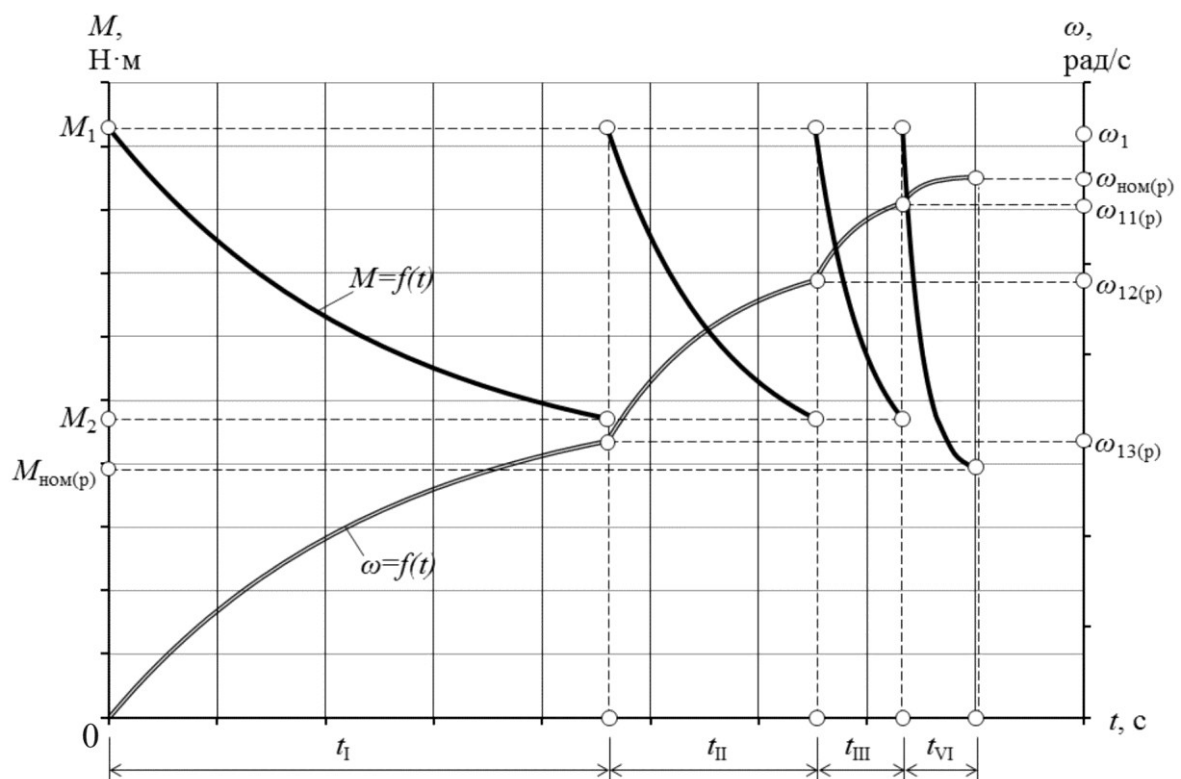


Рис. 8. Графіки переходних процесів

9. Розробити принципову схему управління електроприводом, урахувавши основні вимоги, які ставлять до схем управління.

Розробка схеми управління залежить від режиму управління (ручний, автоматичний чи автоматизований), а також від типу системи (релейно-контактний чи безконтактний).

Під час розробки системи автоматизованого управління і системи автоматизованого регулювання бажано (де виправдовують техніко-

економічні міркування) в колах схеми управління застосувати засоби мікропроцесорної техніки.

Розроблюючи схеми управління електроприводом, треба орієнтуватися на сучасні технічні засоби (тиристорне управління, тиристорні пускачі, мікродатчики, мікропроцесори тощо).

Під час розробки системи електроприводу, схем управління та їх експлуатації необхідно забезпечити, щоб нормально працювали як їхні електротехнічні компоненти, так і система загалом. Потрібно розрахувати й вибрати апаратуру електричного захисту: мінімального захисту – від зниження напруги; максимального захисту (струмову) – від надмірних перевантажень і струмів короткого замикання; теплового захисту – від невеликих, але тривалих перевантажень, а також комутаційну апаратуру.

Командокотролери вибирають згідно зі схемою управління приводом.

Контактори призначено для комутації силового струму в головних колах електроприводу. У кранових електроприводах використовують контактори з електромагнітним приводом, які вибирають за пусковим струмом двигуна.

Схема електрична принципова керуванням пуску, противмикання і динамічним гальмуванням асинхронного двигуна з фазним ротором приводу механізму підйому зображено на рис. 9.

Зображена схема забезпечує:

- пуск двигуна у чотири ступені у функції часу;
- противмикання у функції ЕРС ротора;
- динамічне гальмування у функції часу;
- роботу на штучних характеристиках.

Обмеження струму в пускових режимах здійснюється резисторами R_1, R_2, R_3, R_4 ; у режимі противмикання – резистором $R_{пр}$; у режимі динамічного гальмування $R_{д.г.}$.

Живлення оперативного кола і кола динамічного гальмування постійним струмом здійснюється від напівпровідникових випрямлячів VD1 через трансформатор TV. Живлення реле противмикання KV2, яке контролює ЕРС ротора, постійним струмом забезпечують випрямлячі VD2, що підключені до двох фаз ротора двигуна.

Керування роботою двигуна здійснюється за допомогою командоконтролера, який має сім положень: одне нульове «0», три «вперед» («F»), три «назад» («R»).

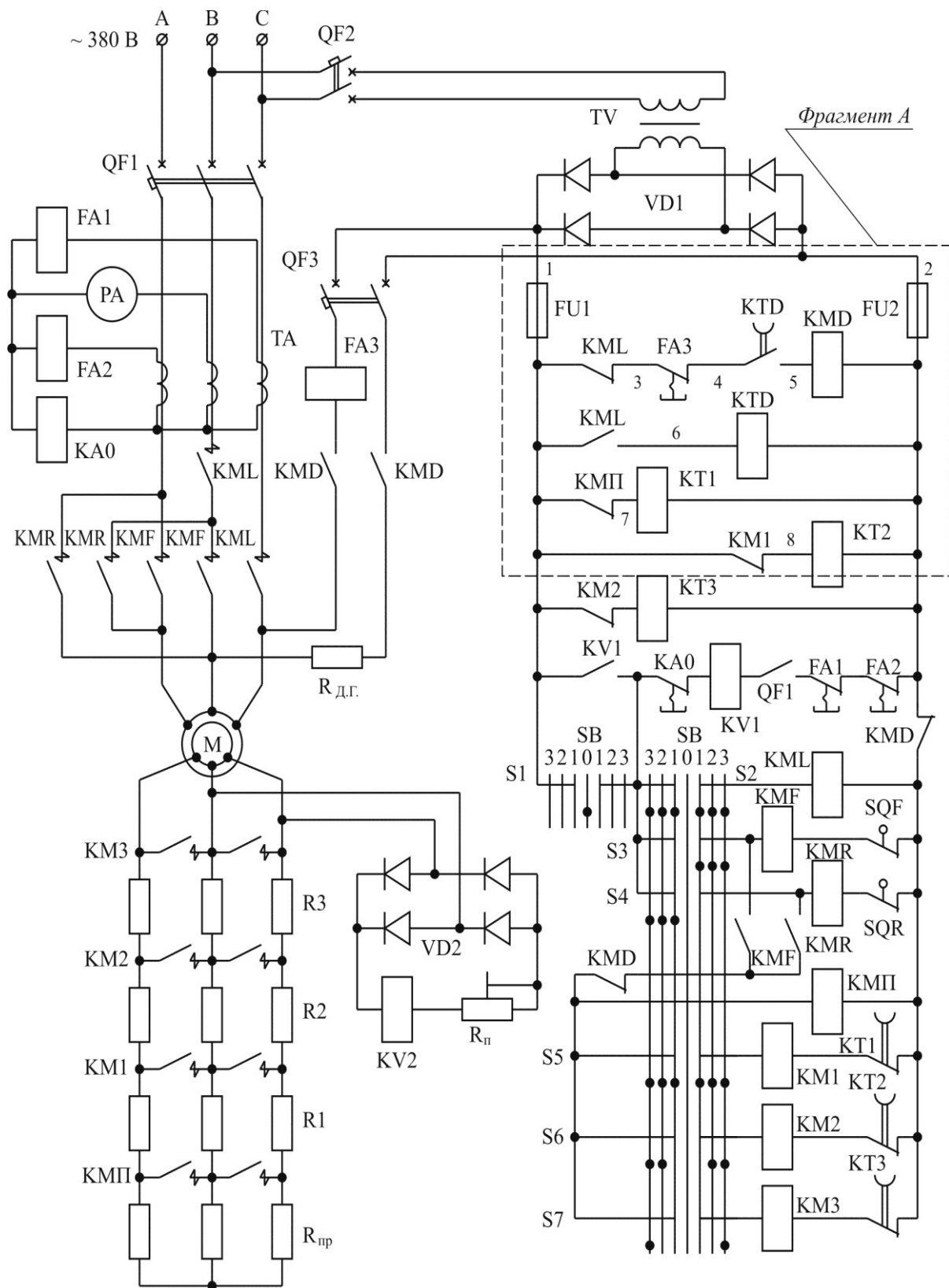


Рис. 9. Схема електрична принципова керуванням приводу механізму підйому

Схема працює таким чином. Підготовка до роботи здійснюється вмиканням автоматичних вимикачів QF1, QF2 і рубильника SA; командоконтролер SB встановлюється у нульове положення. При цьому одержує живлення реле нульового захисту KV1, яке своїми контактами шунтує першу контактну групу S1 командоконтролера SB. Спрацьовують реле часу (прискорення) KT1, KT2, KT3 розмикаючи свої контакти в колі живлення контакторів прискорення KM1, KM2, KM3.

Для пуску двигуна в напрямі «вперед» з виходом на природну характеристику командоконтролер SB переводять у третє положення («F»). Замикаються контактні групи S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7; розмикається контактна група S1. Спрацьовують контактори KML, KMF і двигун запускається в напрямі «вперед».

Блок-контакти контактора KML розмикаються в колі обмотки контактора динамічного гальмування KMD. Спрацьовує реле часу динамічного гальмування KTD; через блок-контакти контактора противмикання КМП одержує живлення реле KT1. Після закінчення витримки часу контакти KT1 замикаються в колі котушки контактору KM1, який силовими контактами шунтує пускові резистори R1, а блок-контактами розмикають коло живлення реле KT2. Після закінчення витримки часу, реле KT2 замикає свої контакти в колі контактора KM2, який шунтує пусковий резистор R2. Аналогічно спрацьовує контактор KM2, а двигун виходить на природну характеристику.

Для реверсування двигуна командокотролер SB переводять у третє положення («R»). В результаті замикається контактна група S4 і розмикається S3 командокотролера SB. Порядок чергування фаз обмотки статора змінюється для напрямку обертання «назад». Втрачають живлення контактори КМП, KM1, KM2, KM3. Оскільки ЕРС ротора в режимі противмикання збільшує своє значення у порівнянні з номінальним ($E_{р.п} > E_{р.н}$), то реле KV2 спрацьовує і розмикає свої контакти в колі обмотки контактора КМП. Реверс двигуна відбувається за наявності резисторів R1, R2, R3 і $R_{пр}$ у колі ротора двигуна, які обмежують струм до припустимого значення.

Спрацьовують реле часу KT1, KT2, KT3, розмикаючи свої контакти в колі обмоток контакторів KM1, KM2, KM3. Двигун гальмується, зменшується ЕРС його ротору. Коли ЕРС зменшиться до значення (1,1..1,15)

$E_{p.n.}$, контакти реле KV2 замкнуться в колі обмотки контактора КМП. Силові контакти КМП шунтують резистор $R_{пр}$. Далі процес відбувається аналогічно пуску.

Режим динамічного гальмування здійснюється перемиканням командокотролера SB у нульове положення. При цьому втрачають живлення контактори KML, KMR, КМП, КМ1, КМ2, КМ3. Статор двигуна вимикається з мережі, а ротор вмикаються пускові резистори R1, R2, R3, $R_{пр}$. Блок-контакти KML вмикаються в колі живлення котушки контактора KMD, а інші блок-контакти розмикаються в колі реле часу KTD. На період витримки часу реле KTD, контактор KMD вмикається і подає постійний струм на дві фази статора. Двигун переходить у режим динамічного гальмування. Після закінчення витримки, реле часу KTD розмикає коло живлення контактора KMD. Схема повертається у вихідне положення.

Схемою передбачено роботу двигуна на проміжних штучних характеристиках. Для цього командокотролер SB переводять у перше, друге або третє положення для режиму «вперед» («F») або «назад» («R»).

Схема забезпечує максимальний струмовий захист миттєвої дії за допомогою струмових реле FA1, FA2, які вимірюють струм статора за допомогою трансформаторів струму ТА; захист від неповно фазного режиму і обриву фази (реле нульової послідовності струму КА0); захист від самозапуску і недопустимого зниження напруги (реле нульового захисту KV1); захист від перевантажень і коротких замикань оперативного кола (за допомогою запобіжників FU). Автоматичні вимикачі QF1, QF2 забезпечують захист від коротких замикань.

10. Вибір апаратури захисту та керування

Для захисту електроприводу піднімальних кранів від перевантажень використовують електромагнітні реле миттєвої дії типу РЗО 401, які мають спрацьовувати, коли $I_{сп}=2,5I_{см}$, де $I_{см}$ – номінальний струм статора вибраного двигуна.

Щоб вибрати пускорегулювальні та інші резистори, треба визначити еквівалентний тривалий струм, який проходить через резистори:

$$I_{екв.т.р} = 1,25I_{см.пот} \sqrt{\frac{TB\%_{розр}}{100\%}}, \text{ А}, \quad (49)$$

де $I_{см.пот}=M_{см}/K$ – сила струму при статичному моменті опору в процесі піднімання номінального вантажу; $K=M_{ном}/I_{см}$ – коефіцієнт пропорційності.

Для резисторів режиму противоввімкнення (попередні ступені приводу піднімання):

$$I_{екв.д} = I_{ст.пот} \sqrt{\frac{TB\%_{розр}}{100\%}}, \text{ А,} \quad (50)$$

для резисторів попереднього ступеня приводів пересування

$$I_{екв.д} = 0,8I_{ст.пот} \sqrt{\frac{TB\%_{розр}}{100\%}}, \text{ А.} \quad (51)$$

Під час добору коробок опорів припустимі відхилення фактичного значення опору від розрахункового $\pm 20\%$, при цьому розраховані значення пускових опорів округлюються до сотих частин.

11. Розробка монтажноі схеми щита керування приводом механізму підйому мостового крану

На монтажній схемі слід зобразити з'єднання між елементами схеми електричної принципової керуванням приводу механізму підйому крану. Приклад фрагменту монтажноі схеми, який виконаний для фрагменту електричної схеми принципової (див. рис.9, фрагмент А), наведено на рис.10 (з'єднання, які не входять до складу фрагменту схеми, позначені значком (?)).

Елементи схеми позначаються у вигляді окремих блоків, до складу яких входять всі використані частини елемента. Наприклад, блок електромагнітного контактора має в себе включати котушку, всі задіяні силові та блок-контакти.

Блок позначається порядковим номером та позицією на схемі електричній принциповій.

Відповідний вивід блоку маркується позначенням блоку, з яким він з'єднується, та номером провідника.

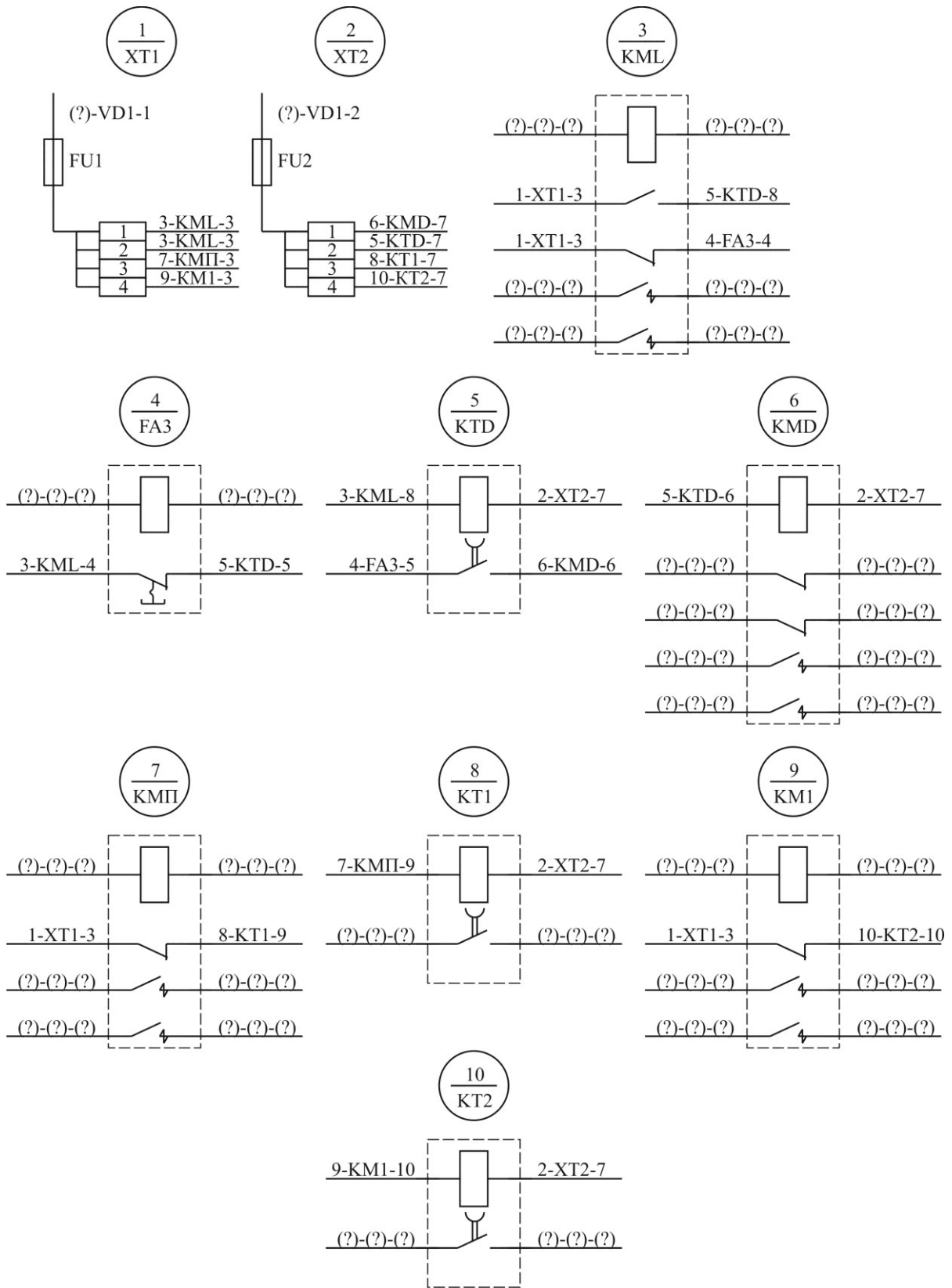


Рис.10. Фрагмент схеми щита керуванням приводу механізму підйому

Список літератури

1. Електромеханічні системи автоматизованого керування та електроприводи: навч. посібник /за ред. М.Г. Поповича. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.
2. Попович М.Г. Теорія електроприводу / М.Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.
3. Лавриненко Ю.М. Електропривід: підручник. – Вид. 2-е, доп. і перероб. – Київ., Ліра-К., 2009. – 503 с.
4. Видмиш А.А. Основи електропривода. Теорія та практика. Ч. 1. : навч. посіб. / А.А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця : ВНАУ, 2020. – 387 с.
5. Колб Ант. А. Теорія електроприводу: навч. посіб. – 2-ге вид. перероб. і доп. / Ант. А. Колб, А. А. Колб. –Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
6. ДСТУ 3120-95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин. Затверджено та надано чинності наказом Держстандарту України. Київ. від 09 жовтня 1997 р. № 620.

Навчально-методичне видання

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Методичні вказівки та завдання
до виконання курсового проєкту
для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціалізації
«Електромеханічні системи автоматизації»

Укладачі: **Голенков** Геннадій Михайлович,
Бондар Роман Петрович

Комп'ютерне верстання *А.П. Селівестрової*

Ум. друк. арк. 1,63. Обл.-вид. арк. 1,75
Електронний документ. Вид № 85/V-25

Виконавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури
Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.