

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**М. Я. Островерхов**

# **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД РОЗРАХУНКОВА РОБОТА**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізацією «Автоматизація  
хіміко-технологічних процесів і виробництв»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

2018

Рецензенти: *Бур'ян С.О.*, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу факультету електроенерготехніки та автоматики

*Чумак В.В.*, канд. техн. наук, доцент кафедри електромеханіки факультету електроенерготехніки та автоматики

Відповідальний  
редактор

*Перетятко Ю.В.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №7 від 29.03.2018 р.)  
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики  
(протокол № 8 від 27.03.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Островерхов Микола Якович*, д-р техн. наук, професор

# ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

**Електричні машини та електропривод: Розрахункова робота** [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництв» / М. Я. Островерхов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 76 с.

У навчальному посібнику наведено теоретичні відомості з електромеханічних властивостей асинхронних електричних машин, способи керування швидкістю, гальмування та зміни напрямку обертання асинхронних двигунів, порядок розрахунку потужності і вибору двигуна електропривода робочої машини, приклади рішення завдань розрахункової роботи, а також завдання на розрахункову роботу для самостійного розв'язання студентами.

Призначено для студентів інженерно-хімічного факультету, які навчаються за спеціалізацією «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництв».

© М. Я. Островерхов  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

## ЗМІСТ

Вступ	4
1 Завдання на розрахункову роботу	5
2 Теоретичні відомості та методичні рекомендації	10
2.1 Визначення та склад електропривода	10
2.2 Режими роботи електричних машин	12
2.3 Види статичних моментів механізмів	17
2.4 Жорсткість механічних характеристик та робоча точка	22
2.5 Електромеханічні властивості асинхронного двигуна	26
2.6 Методика розрахунку потужності двигуна	59
2.7 Приклади типових розрахунків	63
Список рекомендованої літератури	75
Додаток. Приклад оформлення титульного листа	76

## ВСТУП

Розрахункова робота з кредитного модуля «Електричні машини та електропривод» призначена для закріплення теоретичних знань й надбання практичних навичок при вирішенні задач із розрахунку потужності й вибору двигунів електроприводів робочих машин, способів керування швидкістю електродвигунів та їх електромеханічних властивостей.

Номер індивідуального завдання на розрахункову роботу відповідає номеру студента в списку викладача відповідної навчальної групи.

Розрахункова робота оформлюється на аркушах паперу формату А4. Текст та інші матеріали пояснювальної записки розміщується з однієї сторони аркушів паперу. Пояснювальна записка роботи складається з титульного листа, послідовно розташованих номеру й змісту завдання та розрахунків із поясненням результатів. У кінці пояснювальної записки наводиться висновок з конкретними результатами по кожному завданню роботи. Розрахунки за формулами представляються у вигляді: формула - числові значення змінних - результат. Обов'язково вказуються одиниці вимірювання змінних. Пояснювальна записка виконується в редакторі Word: шрифт Times New Roman, розмір 14; інтервал 1,5 рядка; ліве поле аркуша паперу 3 см, верхнє та нижнє 2 см, праве 1,5 см; нумерація сторінок проставляється вгорі праворуч (на титульному аркуші номер сторінки не вказується). Формули представляються в редакторі формул. За приклад оформлення розрахункової роботи можна взяти оформлення даних методичних вказівок. Приклад титульного листа наведено в додатку.

## 1 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВУ РОБОТУ

- 1.1 Розрахувати потужність двигуна робочої машини з маховиком згідно даних табл. 1.1 та вибрати асинхронну електричну машину з табл. 1.2. Представити кінематичну схему робочої машини. Розрахувати момент інерції маховика робочої машини.
- 1.2 Розрахувати й побудувати в I-му квадранті *природну* механічну характеристику вибраного асинхронного двигуна в координатах  $\omega=f(M)$  та  $s=f(M)$  за даними табл. 1.2.
- 1.3 Розрахувати для I-го квадранту та побудувати разом із природною характеристикою *штучні* механічні характеристики  $\omega=f(M)$  та  $s=f(M)$  при зміні напруги статора  $U_1$  відповідно до даних табл. 1.3.
- 1.4 Розрахувати для I-го квадранту та побудувати разом із природною характеристикою *штучні* механічні характеристики  $\omega=f(M)$  при зміні напруги статора одночасно із зміною частоти за законом керування  $U_1/f_1=const$  відповідно до даних табл. 1.3.
- 1.5 Розрахувати для I-го квадранту та побудувати разом із природною характеристикою *штучні* механічні характеристики  $\omega=f(M)$  та  $s=f(M)$  при зміні електричного опору кола ротора відповідно до даних табл. 1.3.

Таблиця 1.1

## Вихідні дані робочої машини

Варіант	Робота операції	Робота холостого ходу	Число ходів	Коефіцієнт передачі кінематичного ланцюга,	ККД кінематичного ланцюга
Т	$A_{оп}$ , Дж	$A_{хх}$ , Дж	$n$ , хід/хв	$i$	$\eta$
1	13929	7661	24	59,38	0,81
2	13004	6901	32	44,53	0,82
3	24470	12541	22	64,43	0,81
4	20879	10344	36	39,79	0,82
5	9258	4438	92	15,82	0,86
6	13082	6074	80	18,09	0,86
7	18883	8497	70	20,57	0,88
8	46086	20116	44	32,56	0,85
9	50838	21539	50	28,80	0,88
10	36281	14931	74	19,56	0,87
11	19093	7637	16	58,13	0,72
12	19293	7505	20	47,00	0,69
13	5805	2198	86	11,22	0,79
14	12860	4740	54	17,78	0,8
15	14374	5162	60	16,00	0,8
16	15918	5571	68	14,12	0,82
17	13477	4600	100	9,65	0,83
18	15597	5193	120	8,08	0,84
19	21725	7061	104	9,27	0,84
20	24365	7732	114	8,46	0,84
21	8153	2527	40	17,81	0,85
22	6610	2003	56	12,79	0,87
23	9966	2952	58	12,35	0,86
24	20499	5937	42	16,96	0,81
25	25202	7140	46	15,41	0,88
26	22736	6304	54	13,33	0,88
27	17330	4704	86	8,42	0,87
28	39708	10554	52	13,85	0,88
29	59139	15397	48	15,00	0,87
30	33230	8476	94	7,70	0,9

Таблиця 1.2

## Номінальні дані асинхронних двигунів

№, з/п	Потужність $P_n$ , кВт	Частота напруги $f_n$ , Гц	Напруга статора $U_{1n}$ , В	Номінальне ковзання $s_n$ , %	ККД %	$\cos\phi$	ЕРС ротора $E_{2n}$ , В	Струм ротора $I_{2n}$ , А
1	14	50	380	5	86,5	0,85	330	27
2	17	50	220	5	88	0,87	315	34
3	22	50	380	5,5	87	0,86	300	43
4	30	50	220	4,5	88	0,81	290	63
5	37	50	380	3	90	0,88	360	62
6	45	50	220	3,5	90	0,88	375	75
7	55	50	380	4	89,5	0,87	170	200
8	75	50	220	4,5	90	0,88	180	250
9	90	50	380	4	91,5	0,87	220	260
10	110	50	220	3,5	92	0,90	250	260
11	13	50	380	7	83,5	0,81	205	42
12	17	50	220	6	85	0,82	335	32,5
13	22	50	380	3,5	88	0,81	380	37
14	30	50	220	4	88,5	0,82	375	46
15	37	50	380	4	89	0,86	140	180
16	45	50	220	4	89,5	0,86	155	200
17	55	50	380	3,5	91	0,88	190	185
18	75	50	220	3	91,5	0,85	250	200
19	90	50	380	3,6	90	0,88	202	277
20	110	50	220	3,6	91,5	0,87	230	297
21	11	50	380	5	85	0,72	315	22,5
22	14	50	220	4,5	86,5	0,69	310	28
23	22	50	380	4,5	87	0,79	330	40
24	30	50	220	5	86,5	0,80	120	165
25	37	50	380	5,5	87,5	0,80	115	190
26	45	50	220	4	89	0,82	140	190
27	55	50	380	3,5	89,5	0,83	190	185
28	75	50	220	4	90,5	0,84	190	257
29	90	50	380	4	90,5	0,84	214	267
30	110	50	220	3,5	91,5	0,84	225	311



Продовження таблиці 1.2

№, з/п	Число полюсів 2p	Схема обмотки статора	Опір R <sub>1</sub> , Ом	Опір R <sub>2</sub> (R <sub>p</sub> ), Ом	Опір X <sub>1</sub> , Ом	Опір X <sub>2</sub> , Ом	Опір X <sub>μ</sub> , Ом	Момент інерції J, кг*м <sup>2</sup>
1	4	зірка	0,1032	0,3528	0,7222	0,5431	17,641	0,57
2	4	трикутник	0,0682	0,2674	0,5115	0,3505	13,907	0,62
3	4	зірка	0,0580	0,2215	0,4689	0,2914	10,876	0,89
4	4	трикутник	0,0380	0,1196	0,3323	0,1930	7,441	1,04
5	4	зірка	0,0306	0,1006	0,2926	0,2619	9,722	1,53
6	4	трикутник	0,0222	0,1010	0,2330	0,2263	8,660	2,2
7	4	зірка	0,0202	0,0196	0,2359	0,0471	1,521	2,8
8	4	трикутник	0,0149	0,0187	0,1962	0,0439	1,330	3,5
9	4	зірка	0,0094	0,0195	0,1412	0,0472	1,612	3,65
10	4	трикутник	0,0071	0,0194	0,1247	0,0538	1,887	3,83
11	6	зірка	0,1068	0,1973	0,7473	0,2169	6,481	0,95
12	6	трикутник	0,0791	0,3571	0,5932	0,4597	14,283	1,05
13	6	зірка	0,0571	0,2075	0,4611	0,4598	14,824	1,5
14	6	трикутник	0,0431	0,1883	0,3772	0,3663	12,237	1,7
15	6	зірка	0,0453	0,0180	0,4331	0,0586	1,212	2,8
16	6	трикутник	0,0269	0,0179	0,2830	0,0470	1,253	4,5
17	6	зірка	0,0195	0,0208	0,2282	0,0569	1,720	4,8
18	6	трикутник	0,0122	0,0217	0,1610	0,0695	2,165	5,6
19	6	зірка	0,0131	0,0152	0,1974	0,0556	1,305	10,7
20	6	трикутник	0,0092	0,0161	0,1621	0,0592	1,431	11,5
21	8	зірка	0,1210	0,4041	0,8470	0,5804	17,782	1,48
22	8	трикутник	0,0841	0,2876	0,6311	0,4188	14,702	1,7
23	8	зірка	0,0742	0,2143	0,5994	0,4508	11,432	2,4
24	8	трикутник	0,0670	0,0210	0,5868	0,0584	1,050	3,5
25	8	зірка	0,0441	0,0192	0,4209	0,0384	0,909	4,8
26	8	трикутник	0,0330	0,0170	0,3469	0,0469	1,149	4,9
27	8	зірка	0,0225	0,0208	0,2633	0,0656	1,660	5,5
28	8	трикутник	0,0172	0,0171	0,2255	0,0562	1,238	12,8
29	8	зірка	0,0129	0,0185	0,1933	0,0611	1,388	14
30	8	трикутник	0,0090	0,0146	0,1583	0,0553	1,295	16,8

Таблиця 1.3

Значення напруги статора  $U_1$   
та додаткового електричного опору в колі ротора  $R_d$

Варіант	Напруга статора $U_1$		Додатковий опір $R_d$	
1	$0,930 \cdot U_{1H}$	$0,830 \cdot U_{1H}$	$0,016 \cdot R_H$	$0,036 \cdot R_H$
2	$0,925 \cdot U_{1H}$	$0,825 \cdot U_{1H}$	$0,017 \cdot R_H$	$0,037 \cdot R_H$
3	$0,920 \cdot U_{1H}$	$0,820 \cdot U_{1H}$	$0,018 \cdot R_H$	$0,038 \cdot R_H$
4	$0,915 \cdot U_{1H}$	$0,815 \cdot U_{1H}$	$0,019 \cdot R_H$	$0,039 \cdot R_H$
5	$0,910 \cdot U_{1H}$	$0,810 \cdot U_{1H}$	$0,020 \cdot R_H$	$0,040 \cdot R_H$
6	$0,905 \cdot U_{1H}$	$0,805 \cdot U_{1H}$	$0,021 \cdot R_H$	$0,041 \cdot R_H$
7	$0,900 \cdot U_{1H}$	$0,800 \cdot U_{1H}$	$0,022 \cdot R_H$	$0,042 \cdot R_H$
8	$0,895 \cdot U_{1H}$	$0,795 \cdot U_{1H}$	$0,023 \cdot R_H$	$0,044 \cdot R_H$
9	$0,890 \cdot U_{1H}$	$0,790 \cdot U_{1H}$	$0,024 \cdot R_H$	$0,044 \cdot R_H$
10	$0,885 \cdot U_{1H}$	$0,785 \cdot U_{1H}$	$0,025 \cdot R_H$	$0,045 \cdot R_H$
11	$0,880 \cdot U_{1H}$	$0,780 \cdot U_{1H}$	$0,026 \cdot R_H$	$0,046 \cdot R_H$
12	$0,875 \cdot U_{1H}$	$0,775 \cdot U_{1H}$	$0,027 \cdot R_H$	$0,047 \cdot R_H$
13	$0,870 \cdot U_{1H}$	$0,770 \cdot U_{1H}$	$0,028 \cdot R_H$	$0,048 \cdot R_H$
14	$0,865 \cdot U_{1H}$	$0,765 \cdot U_{1H}$	$0,029 \cdot R_H$	$0,049 \cdot R_H$
15	$0,860 \cdot U_{1H}$	$0,760 \cdot U_{1H}$	$0,030 \cdot R_H$	$0,050 \cdot R_H$
16	$0,855 \cdot U_{1H}$	$0,755 \cdot U_{1H}$	$0,031 \cdot R_H$	$0,051 \cdot R_H$
17	$0,850 \cdot U_{1H}$	$0,750 \cdot U_{1H}$	$0,032 \cdot R_H$	$0,052 \cdot R_H$
18	$0,845 \cdot U_{1H}$	$0,745 \cdot U_{1H}$	$0,033 \cdot R_H$	$0,053 \cdot R_H$
19	$0,840 \cdot U_{1H}$	$0,740 \cdot U_{1H}$	$0,034 \cdot R_H$	$0,054 \cdot R_H$
20	$0,835 \cdot U_{1H}$	$0,735 \cdot U_{1H}$	$0,035 \cdot R_H$	$0,055 \cdot R_H$
21	$0,830 \cdot U_{1H}$	$0,730 \cdot U_{1H}$	$0,036 \cdot R_H$	$0,056 \cdot R_H$
22	$0,825 \cdot U_{1H}$	$0,725 \cdot U_{1H}$	$0,037 \cdot R_H$	$0,057 \cdot R_H$
23	$0,820 \cdot U_{1H}$	$0,720 \cdot U_{1H}$	$0,038 \cdot R_H$	$0,058 \cdot R_H$
24	$0,815 \cdot U_{1H}$	$0,715 \cdot U_{1H}$	$0,039 \cdot R_H$	$0,059 \cdot R_H$
25	$0,960 \cdot U_{1H}$	$0,860 \cdot U_{1H}$	$0,010 \cdot R_H$	$0,030 \cdot R_H$
26	$0,955 \cdot U_{1H}$	$0,855 \cdot U_{1H}$	$0,011 \cdot R_H$	$0,031 \cdot R_H$
27	$0,950 \cdot U_{1H}$	$0,850 \cdot U_{1H}$	$0,012 \cdot R_H$	$0,032 \cdot R_H$
28	$0,945 \cdot U_{1H}$	$0,845 \cdot U_{1H}$	$0,013 \cdot R_H$	$0,033 \cdot R_H$
29	$0,940 \cdot U_{1H}$	$0,840 \cdot U_{1H}$	$0,014 \cdot R_H$	$0,034 \cdot R_H$
30	$0,935 \cdot U_{1H}$	$0,835 \cdot U_{1H}$	$0,015 \cdot R_H$	$0,035 \cdot R_H$



## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

### 2.1 Визначення та склад електропривода

Згідно до стандарту ДСТУ 2313-93 *електроприводом* називається електромеханічна система, яка складається з електродвигунного, перетворювального, передавального та керуючого пристроїв, і яка призначена для приводу в рух робочих органів машини й керування цим рухом (рис. 2.1).

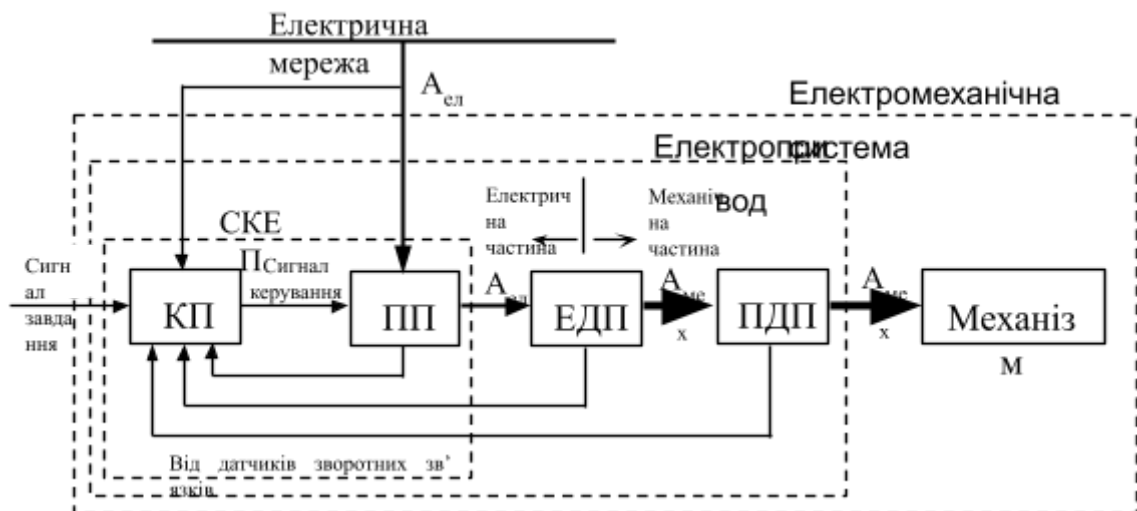


Рисунок 2.1 – Функціональна схема електропривода

Для виконання своїх функцій електропривод підключено до електричної мережі, з якої він споживає електроенергію. Якщо електропривод живиться не від мережі, а від окремого джерела електроенергії (акумуляторна чи сонячна батарея, дизель-генератор тощо), то він називається *автономним*.

Електродвигунний пристрій (ЕДП) – це *основний* елемент електропривода. В якості ЕДП виступають електричні машини різних типів (двигуни постійного струму, асинхронні та синхронні двигуни змінного струму, лінійні та дугостаторні двигуни, вентильні та крокові двигуни тощо), які перетворюють електричну енергію в механічну. (В режимах гальмування згідно зворотності електричних машин може здійснюватись зворотне перетворення механічної енергії від механізму в електричну енергію, що віддається до мережі).

Перетворювальний пристрій (ПП) керує потоком електричної енергії, яка поступає від електромережі до електродвигунного пристрою, із метою зміни режиму роботи останнього. ПП може бути простим, у вигляді силових перемикачів, або складним, у вигляді керованих випрямлячів, перетворювачів частоти, інверторів, широтно-імпульсних перетворювачів тощо. ПП складає силову електричну частину системи керування електроприводом (СКЕП).

Передавальний пристрій (ПДП) необхідний для передачі механічної енергії від двигуна до механізму. Це редуктори, ремінні, рейкові та кривошипно-шатунні передачі, передачі “гвинт-гайка” тощо. Якщо передавальний пристрій відсутній, то електропривод називається *безпосереднім*.

Керуючий пристрій (КП) призначено для керування електродвигунним пристроєм за допомогою перетворювального, а також збору та обробки інформації. Він являє собою несилу інформаційну частину СКЕП. КП у залежності від складності електропривода може бути реалізовано за допомогою кнопок, реле, командоапаратів чи інтегральних мікросхем, мікропроцесорів, керуючих ЕОМ тощо.

За рахунок керованої механічної енергії, отриманої від електропривода, робочий орган робочої машини (кабіна ліфта, сходи ескалатора, шпindelь станка, гак крана, маніпулятор робота тощо) виконує необхідний технологічний рух. Основними координатами цього механічного руху є кутова (лінійна) *швидкість*, *момент* (зусилля), кутове (лінійне) *положення*, тому і системи керування електроприводів розділяються на три основні види:

- 1) керування швидкістю;
- 2) керування моментом (зусиллям);
- 3) керування положенням.

## 2.2 Режими роботи електричних машин

У залежності від характеру навантаження стандарт ГОСТ 183-74 регламентує вісім режимів роботи електричних машин, умовно позначених S1-S8. Режими S1, S2, S3 є основними і вказуються в паспортних даних електричних машин.

*Тривалий номінальний режим роботи S1* характеризується незмінним номінальним навантаженням  $P_n$ , за час дії якого перегрів усіх частин електричної машини відносно температури навколишнього середовища досягає усталеного значення  $\tau_{уст}$  (рис. 2.2).

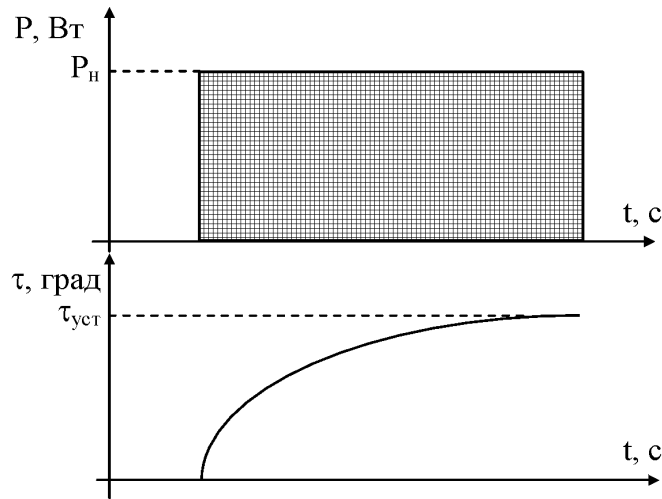


Рисунок 2.2 – Тривалий номінальний режим роботи

*Короткочасний номінальний режим роботи S2* характеризується періодом включення  $t_p$  при незмінному номінальному навантаженні  $P_n$ , за який перегрів електричної машини *не досягає* усталеного значення, та періодом відключення, при якому двигун охолоджується до температури навколишнього середовища (рис. 2.3). Стандартні значення періоду роботи становлять 10, 30, 60 та 90 хвилин.

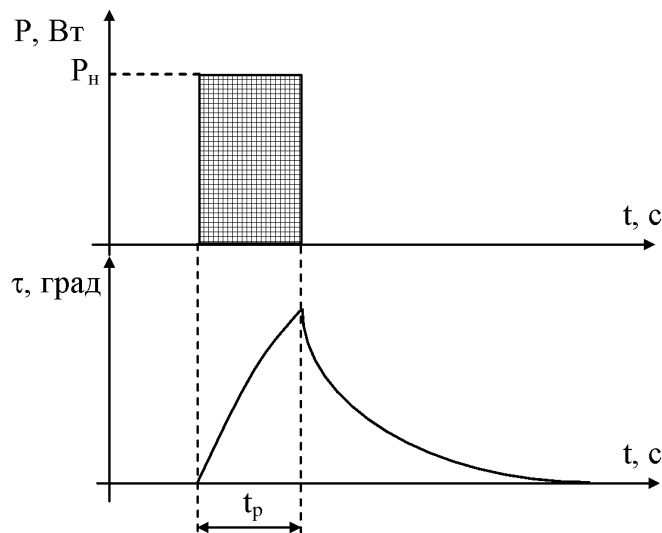


Рисунок 2.3 – Короткочасний номінальний режим роботи

*Повторно-короткочасний номінальний режим роботи S3* характеризується періодами включення  $t_p$  із незмінним номінальним навантаженням  $P_n$  та періодами відключення  $t_o$ , причому за час роботи та охолодження перегрів електричної машини *не досягає* усталених значень

Повторно-короткочасний режим роботи характеризується відносною тривалістю включення

$$PB = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100\% = \frac{t_p}{T_u} 100\% \quad (2.1)$$

Стандартні значення відносної тривалості включення становлять 15, 25, 40 та 60 %. При цьому тривалість циклу  $T_u$  не повинна перевищувати 10 хвилин, інакше режим роботи є S1.

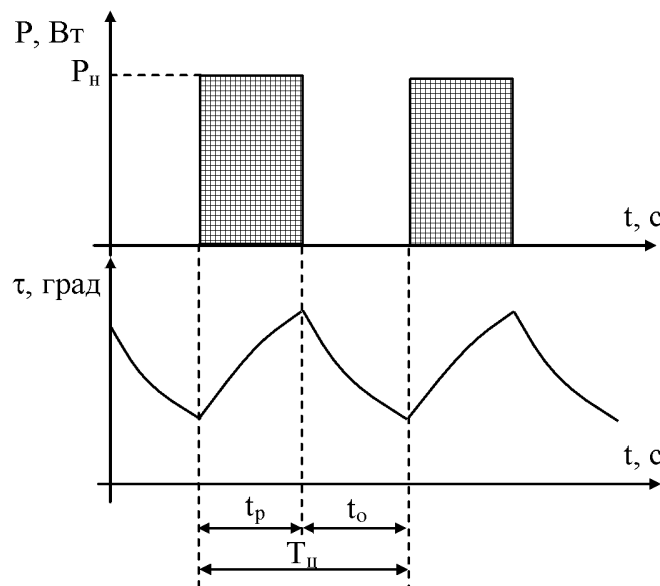


Рисунок 2.4 – Повторно-короткочасний номінальний режим роботи

*Повторно-короткочасний номінальний режим роботи із частими пусками S4* відрізняється від режиму S3 тим, що пускові втрати суттєво

впливають на перегрів електричної машини. Цей режим характеризується періодами пуску  $t_n$ , включення  $t_p$  та відключення  $t_o$ , причому перегрів двигуна *не досягає* усталених значень.

Відносна тривалість включення визначається в цьому випадку наступним виразом

$$ПВ = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_o} 100\% = \frac{t_n + t_p}{T_u} 100\% \quad (2.2)$$

Стандартні значення відносної тривалості включення становлять як і для режиму S3.

Крім того, даний режим характеризується числом включень електричної машини на годину: 30, 60, 120 та 240, а також коефіцієнтом інерції – це відношення суми моменту інерції двигуна  $J_{\partial\delta}$  та приведенного моменту механізму  $J'_{mex}$  до моменту інерції двигуна  $J_{\partial\delta}$

$$FI = \frac{J_{\partial\delta} + J'_{mex}}{J_{\partial\delta}} \quad (2.3)$$

Стандартні значення коефіцієнта інерції становлять 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3; 10.

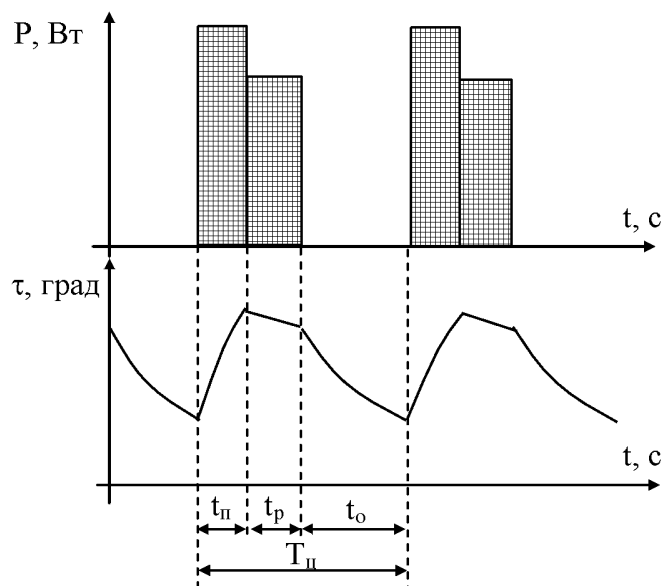


Рисунок 2.5 – Повторно-короткочасний номінальний режим роботи із частими пусками

*Повторно-короткочасний номінальний режим роботи із частими пусками та електричним гальмуванням S5* відрізняється від режиму S4 тим, що втрати при електричному гальмуванні також суттєво впливають на перегрів електричної машини. Цей режим характеризується періодами пуску  $t_n$ , включення  $t_p$ , гальмування  $t_2$  та відключення  $t_o$ , причому перегрів двигуна *не досягає* усталених значень.

Відносна тривалість включення визначається в цьому випадку наступним виразом

$$ПВ = \frac{t_n + t_p + t_2}{t_n + t_p + t_2 + t_o} 100\% = \frac{t_n + t_p + t_2}{T_u} 100\% \quad (2.4)$$

Число включень двигуна на годину становить як і для режиму S4, а коефіцієнт інерції: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3; 10.

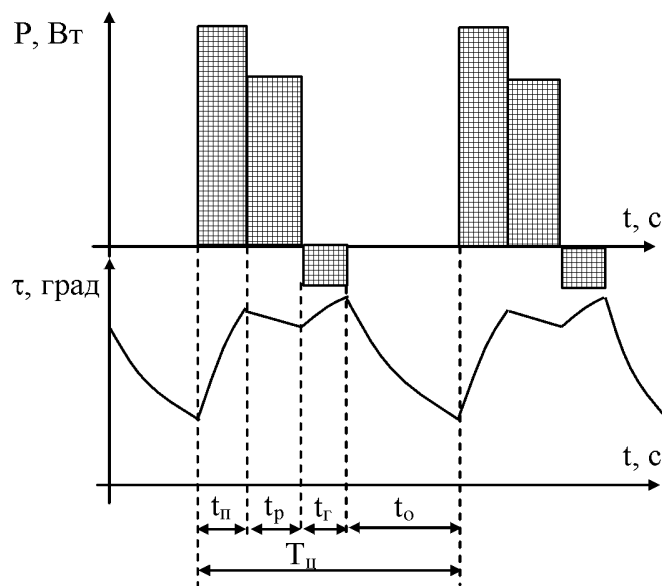


Рисунок 2.6 – Повторно-короткочасний номінальний режим роботи із частими пусками та електричним гальмуванням

*Переміжний номінальний режим роботи S6* відрізняється від повторно-короткочасного режиму S3 тим, що після роботи електрична машина не відключається, а продовжує працювати на холостому ході.

*Переміжний номінальний режим роботи із частими реверсами S7* характеризується періодами роботи з незмінним навантаженням, що чергуються з реверсами, втрати в яких суттєво впливають на перегрів електричної машини. Перегрів при цьому не досягає усталеного значення.

Тривалість циклу характеризується числом включень на годину: 30, 60, 120 та 240 при коефіцієнті інерції: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0.

*Переміжний номінальний режим роботи з декількома швидкостями S8* характеризується періодами роботи на декількох швидкостях при різних незмінних навантаженнях. Перегрів при цьому не досягає усталеного значення.

Тривалість циклу характеризується числом включень на годину: 30, 60, 120 та 240 при коефіцієнті інерції: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0. Даний режим

характеризується також відносною тривалістю навантаження на кожній швидкості: 15, 25, 40 та 60 %.

### 2.3 Види статичних моментів механізмів

Усталений режим роботи електричної машини характеризується механічною характеристикою, яка представляє собою залежність його швидкості від моменту  $\omega=f(M)$ . Двигун має одну *природну* механічну характеристику, що відповідає його підключенню до мережі на номінальні (паспортні) дані, та будь-яку кількість *штучних* механічних характеристик при підключенні на неномінальні дані.

Механізми також мають механічні характеристики – це залежність статичного моменту, що створюється робочим органом, від швидкості  $M_c=f(\omega)$  або  $\omega=f(M_c)$ .

За своєю природою та за характером взаємодії з електродвигуном усі статичні моменти розділяються на активні та реактивні:

1) *Активний* статичний момент створюється зовнішніми, по відношенню до двигуна, джерелами енергії (сила пружної деформації, вітру, тяжіння, а також потенціальна сила тощо) незалежно від напрямку руху електропривода. Сила тяжіння  $F$  вантажу механізму підйому завжди направлена до центру Землі

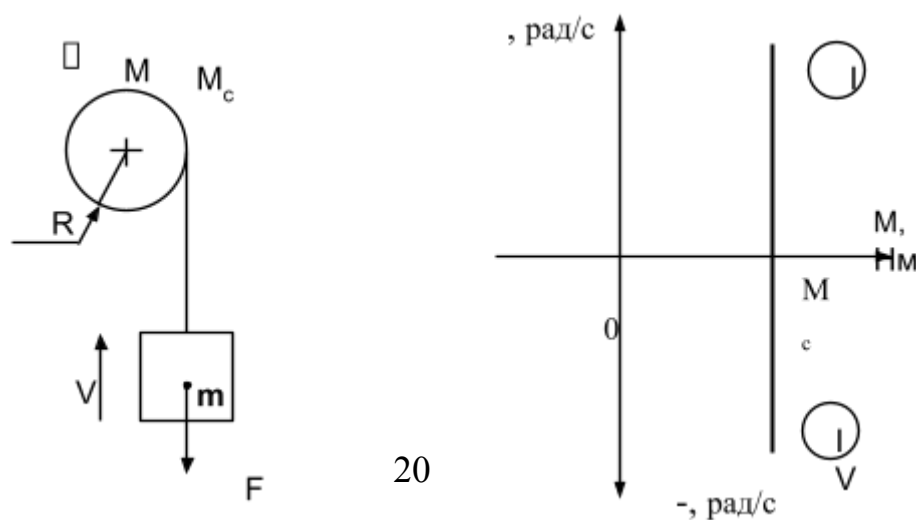


Рисунок 2.7 – Активний статичний момент

Статичний момент, який створює сила тяжіння, дорівнює

$$M_c = F \cdot R = mgR \quad (2.5)$$

де  $R$  – радіус барабана лебідки;

і пропорційно залежить від маси вантажу  $m$ , тому він змінюється від нуля і до максимального значення  $M_{cmax}$  при зміні маси від нуля і до  $m_{max}$ . Цей статичний момент не залежить від величини й напрямку швидкості, тому він не змінює знаку і його механічна характеристика представляє собою пряму, розташовану в I-ому та IV-ому квадранті (четверті) площини. При підйомі вантажу, як показано на рисунку, статичний момент  $M_c$  діє проти моменту двигуна  $M$ . При опусканні вантажу обидва вказані моменти будуть діяти в напрямку моменту  $M_c$ .

Якщо підйомний механізм врівноважено, наприклад, противагою, то момент може змінюватись в більш широких межах

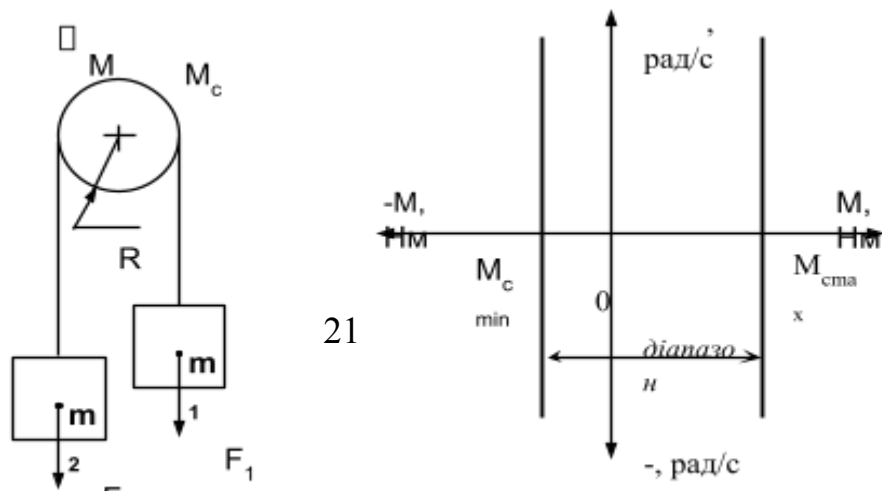


Рисунок 2.8 – Активний статичний момент механізму з противагою

В цьому випадку активний статичний момент дорівнює

$$M_c = m_1 g R - m_2 g R = (m_1 - m_2) g R, \quad (2.6)$$

де  $m_2$  – незмінна маса противаги.

Якщо  $m_1=0$ , то  $M_{cmin} = -m_2 g R$ . При  $m_1=m_2$  момент  $M_c=0$ , а при  $m_1=m_{1max}$  момент дорівнює максимальному додатному значенню  $M_{cmax} > 0$ . Діапазон зміни статичного моменту вказано на рисунку.

2) *Реактивний* момент діє завжди проти напрямку руху, тому він змінює знак при зміні напрямку швидкості. Реактивний момент виникає як реакція на рушійний момент, створений двигуном або іншими активними силами, у тому числі силами інерції. За видом залежності від швидкості реактивний момент умовно розділяється на момент:

- сухого (кулонівського) тертя;
- в'язкого тертя;
- вентиляторного типу.

Момент *сухого (кулонівського) тертя* не залежить від швидкості і змінює стрибком своє значення на протилежне при зміні напрямку руху

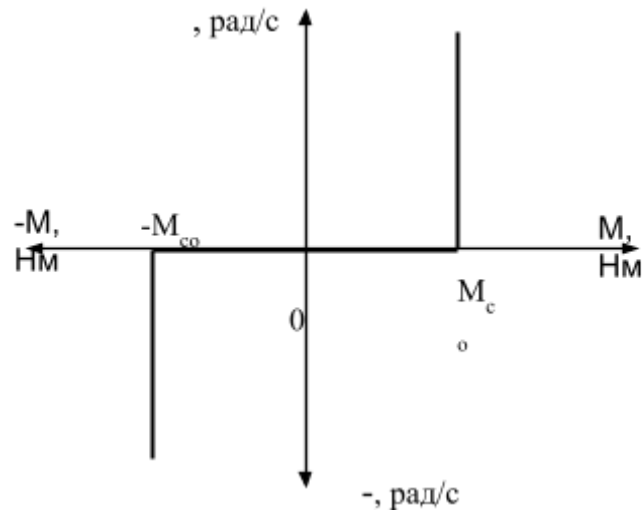


Рисунок 2.9 – Реактивний статичний момент сухого тертя

Момент сухого тертя, який описується наступною залежністю

$$M_{\text{цт}} = \begin{cases} M_{\text{цт}} \operatorname{sign} \omega, & \omega \neq 0 \\ M, & 0 \text{ та } |M| \leq M_c \\ M_{\text{цт}} \operatorname{sign} M, & 0 \text{ та } |M| > M_c \end{cases} \quad (2.7)$$

В механізмах реальний момент сухого тертя має більш складний характер, так як момент зрушення може бути в декілька разів більшим за момент руху.

Технологічні процеси обробки деталей на верстатах мають схожий на момент сухого тертя вигляд, наприклад, момент різання на токарному верстаті

$$M_p = F_z \cdot R \quad (2.8)$$

де  $F_z$  – зусилля різання;  
 $R_p$  – радіус різання.

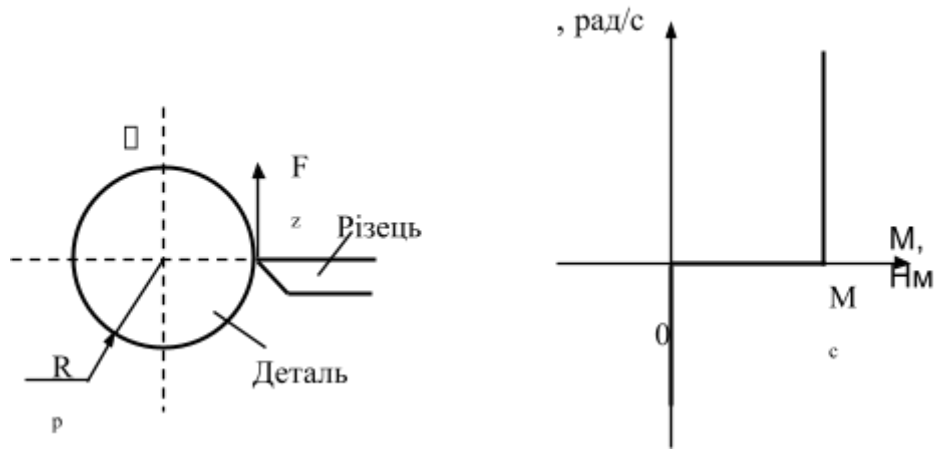


Рисунок 2.10 – Реактивний статичний момент процесу різання

Момент в'язкого тертя лінійно залежить від швидкості

$$M_c = \mu \cdot \omega, \quad (2.9)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт пропорційності.

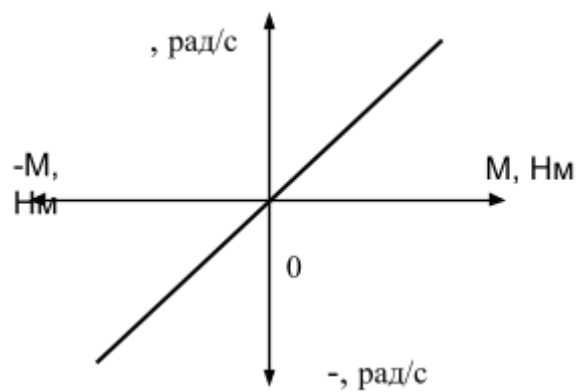


Рисунок 2.11 – Реактивний статичний момент в'язкого тертя

На практиці окремо цей вид моменту зустрічається рідко. Найчастіше він присутній у моменті реального тертя.

Момент *вентиляторного типу* залежить від квадрата швидкості й створюється турбомеханізмами (вентилятори, насоси)

$$M_c = \mu \cdot \omega^2 \quad (2.10)$$

В механізмах цей момент найчастіше діє разом із моментом сухого тертя

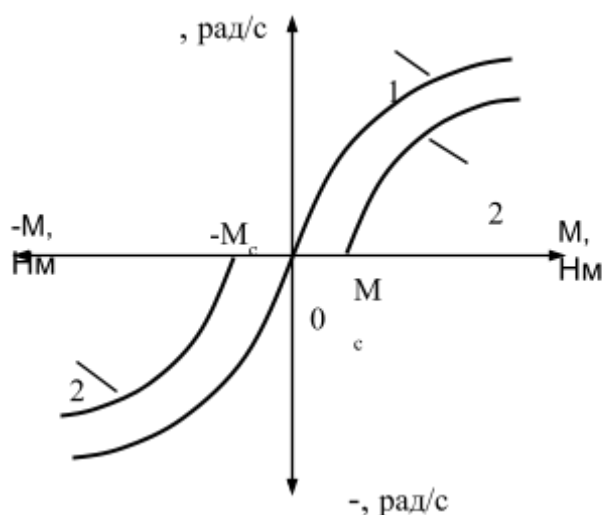


Рисунок 2.12 – Реактивний статичний момент вентиляторного типу:

1 – ідеальний вентиляторний момент; 2 – вентиляторний момент разом із моментом сухого тертя

Деякі механізми, наприклад, відцентрові насоси, які працюють на протитиск, мають залежність від швидкості вище другої степені.



## Рисунок 2.13 – Приклади механічних характеристик

Жорсткість механічної характеристики ДПС має від'ємне значення

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} < 0, \quad (2.13)$$

бо для точок *A* та *B* приріст  $\Delta M > 0$ , а  $\Delta \omega < 0$ .

Синхронний двигун СД має *абсолютно жорстку* механічну характеристику, тобто рівну нескінченності

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_2 - M_1}{\omega_0 - \omega_0} = \infty, \quad (2.14)$$

бо  $\Delta M > 0$ , а  $\Delta \omega = 0$ .

Механічна характеристика представленого механізму є *абсолютно м'якою*, тобто рівною нулю

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_c - M_c}{\omega_2 - \omega_1} = 0, \quad (2.15)$$

так як  $\Delta M = 0$ , а  $\Delta \omega < 0$ .

Якісно жорсткість механічних характеристик у порівнянні описується словами “жорстка”, “м’яка”, “жорсткіша”, “м’якіша”.

Механічні характеристики двигунів характеризуються також швидкістю ідеального холостого ходу  $\omega_0$  (при  $M=0$ ), пусковим моментом  $M_n$  (моментом короткого замикання  $M_{кз}$ ), номінальною швидкістю  $\omega_n$  та номінальним моментом  $M_n$ .

Двигун чи механізм може працювати в будь-якій точці на своїй механічній характеристиці. Конкретна робоча точка (РТ) визначається перетином механічних характеристик двигуна та механізму. В робочій точці момент двигуна дорівнює статичному моменту, який створює механізм  $M=M_c$ . Двигун постійного струму ДПС працює в точці РТ1 із швидкістю  $\omega_c$ , а синхронний двигун СД – в точці РТ2 із швидкістю  $\omega_0$ .

Усталений рух у робочій точці може бути стійким чи нестійким. Умовою стійкого руху є

$$\beta_{дв} < \beta_{мех}, \quad (2.16)$$

тобто жорсткість механічної характеристики двигуна  $\beta_{дв}$  повинна бути меншою жорсткості механічної характеристики механізму  $\beta_{мех}$ . Для ДПС ця умова виконується, бо в робочій точці РТ1

$$(\beta_{дв} < 0) < (\beta_{мех} = 0).$$

Осі механічних характеристик на площині створюють чотири квадранти (четверті) I-IV, як показано на рис. 2.14.

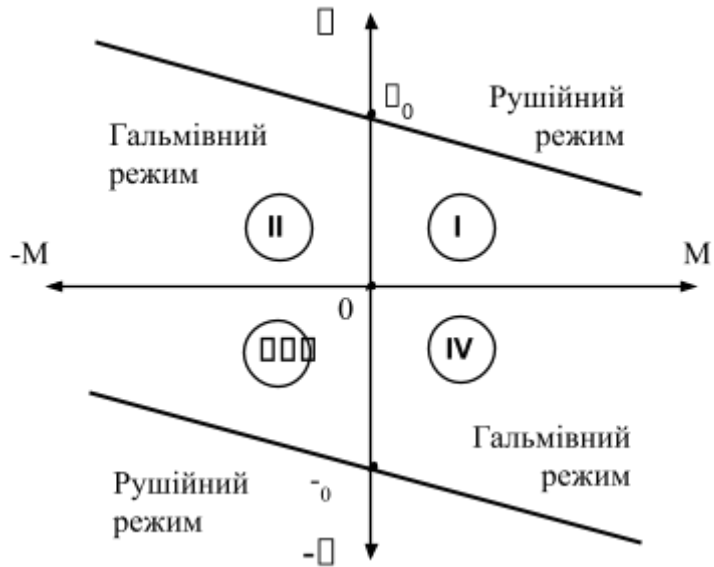


Рисунок 2.14 – Визначення рушійних та гальмівних режимів роботи

Робоча точка двигуна в залежності від статичного моменту та режиму роботи може знаходитися в будь-якому квадранті. Якщо при цьому в робочій точці знаки швидкості та моменту співпадають, то двигун працює в *рушійному* режимі, передаючи енергію механізму (квадранти I, III). Якщо знаки швидкості та моменту різні, то двигун знаходиться в *гальмівному* режимі, отримуючи енергію від механізму (квадранти II, IV). Режими гальмування є нормальними режимами роботи електродвигуна і широко застосовуються для ефективного керування рухом механізмів.

Механічні характеристики двигуна для прямого та зворотного напрямку руху симетричні відносно початку координат.

## 2.5. Електромеханічні властивості асинхронного двигуна

Асинхронний двигун (АД) є найпоширенішим двигуном серед усіх типів двигунів. Він має високу надійність, невеликі масу, габарити й

вартість. Недоліком двигуна є незначний пусковий момент, споживання реактивної потужності, складні математичні залежності між його параметрами, тому якісна система керування реалізується за допомогою відносно складних алгоритмів. Переважна більшість АД використовується у нерегульованих електроприводах.

При підключенні обмотки статора двигуна до мережі створюється магнітне поле, яке обертається із *синхронною* швидкістю

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p}, \text{ [рад/с]} \quad (2.17)$$

маючи синхронну частоту обертання

$$n_c = \frac{60 f_1}{p}, \text{ [об/хв]} \quad (2.18)$$

де  $f_1$  – частота напруги живлення статора, Гц;  
 $p$  – число пар полюсів двигуна.

Для стандартної мережі з частотою напруги  $f_1=50$  Гц існує відповідний ряд синхронних швидкостей у залежності від числа пар полюсів двигуна. Тому при проектуванні механізму потрібно заздалегідь спиратися на вказаний ряд швидкостей (табл. 2.1.).

Таблица 2.1

Ряд синхронних швидкостей асинхронного двигуна

Число пар полюсів	Синхронна частота обертання, об/хв
-------------------	------------------------------------

1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600

Створене магнітне поле індукує ЕРС взаємоіндукції в обмотці статора  $E_1$  та ротора  $E_{2s}$

$$E_1 = K_{w1} W_1 4.4 f_1 \quad (2.19)$$

$$E_{2s} = E_2 s$$

де  $E_2 = K_{w2} W_2 4.4 f_1$  – ЕРС нерухомого ротора;

$W_1, W_2$  – кількість витків обмоток статора та ротора;

$K_{w1}, K_{w2}$  – коефіцієнти намотування обмоток статора та ротора;

$s$  – ковзання двигуна.

Під дією ЕРС  $E_{2s}$  в обмотці ротора протікає струм ротора  $I_2$ , який, взаємодіючи з магнітним потоком  $\Phi$ , створює момент двигуна  $M$ . Цей момент обумовлює обертання ротора із швидкістю  $\omega$  відносно швидкості магнітного поля  $\omega_c$  (25) та визначає ковзання двигуна

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} = \frac{n_c - n}{n_c} \quad (2.20)$$

В залежності від швидкості двигуна ковзання приймає значення відповідно до таблиці

Таблиця 2.2

Типові значення ковзання

Швидкість	Ковзання
$\omega = \omega_c$	$s = 0$
$\omega = 0$	$s = 1$
$\omega = -\omega_c$	$s = 2$
$\omega > \omega_c$	$s < 0$
$\omega < 0$	$s > 1$
$\omega = \omega_n$	$s = s_n$

Часто ковзання представляється у відсотках

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} 100\% = \frac{n_c - n}{n_c} 100\% \quad (2.21)$$

Двигуни нормального виконання мають номінальне ковзання в межах  $s_n = 1,5-6\%$ . Для електроприводів ковальсько-штампувальних машин з маховиком, металургійних, кранових та інших механізмів випускаються двигуни з підвищеним ковзанням  $s_n = 8-12\%$ . Так як ковзання однозначно зв'язане із швидкістю формулою (20), із якої

$$\omega = \omega_c (1 - s) \quad (2.22)$$

то механічна характеристика АД представляється також залежністю ковзання від моменту  $s=f(M)$ .

ЕРС ротора  $E_{2s}$  залежить від ковзання і при синхронній швидкості двигуна  $\omega=\omega_c$  дорівнює нулю  $E_{2s}=0$ , що є ознакою роботи двигуна в точці ідеального холостого ходу. Частота ЕРС ротора  $E_{2s}$  та частота струму ротора  $I_2$  також залежить від ковзання

$$f_2 = f_1 s \quad (2.23)$$

тобто із зменшенням ковзання частота в роторі зменшується і при наближенні швидкості двигуна до синхронної швидкості  $\omega_c$  струм та ЕРС ротора наближаються за формою до постійного струму.

Відношення ЕРС статора до ЕРС нерухомого ротора називається коефіцієнтом трансформації і використовується для приведення параметрів ротора до статора

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_{w1} W_1}{K_{w2} W_2} \approx 0,95 \frac{U_{1n}}{2} \quad (2.24)$$

де  $U_{1n}$  – номінальна лінійна напруга статора;

$E_{2n}$  – номінальна ЕРС ротора.

На основі Г-подібної схеми заміщення фази двигуна з теорії електричних машин виводиться залежність для моменту асинхронного двигуна (рис. 2.15),

де  $U_{1\phi}$  – фазна напруга обмотки статора;

$I_1$  – струм обмотки статора;

$$I'_2 = I_2 \frac{m_1}{m_2} k_e \quad \text{– приведений струм обмотки ротора;}$$

$I_\mu$  – струм намагнічування, який створює магнітний потік  $\Phi$ ;

$X_\mu$  – індуктивний опір взаємоіндукції;

$R_1, X_1$  – активний та індуктивний опори обмотки статора;

$$R'_2 = R_2 \frac{m_1}{m_2} k_e^2 \quad \text{– приведений активний опір кола ротора;}$$

$$X'_2 = X_2 \frac{m_1}{m_2} k_e^2 \quad \text{– приведений індуктивний обмотки ротора;}$$

$m_1, m_2$  – кількість фаз обмоток статора та ротора.

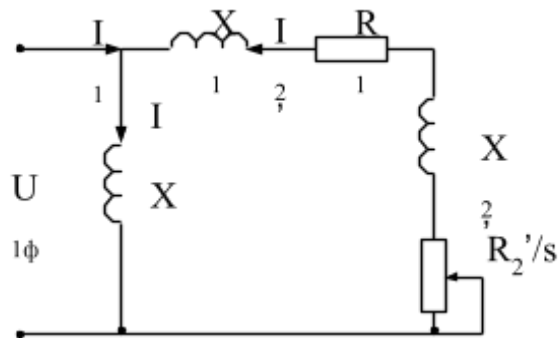


Рисунок 2.15 – Г-подібної схеми заміщення фази асинхронного двигуна

Для трифазного двигуна з фазним ротором  $m_1 = m_2 = 3$ .

Згідно рисунка струм ротора визначається залежністю

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R'_2 / s)^2 + X_k^2}} \quad (2.25)$$

де  $X_k = X_l + X_2'$  – сумарний індуктивний опір.

Активна електромагнітна потужність трифазного АД, яка передається до ротора через повітряний зазор, з однієї сторони дорівнює

$$P_{12} = 3I_2'^2 R_2' / s = \frac{3U_\phi^2 R_2' / s}{(R_l + R_2' / s)^2 + X_k^2}$$

а з іншої

$$P_{12} = M \omega_c$$

Після порівняння вказаних потужностей отримується рівняння електромагнітного моменту асинхронного двигуна

$$M = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_c s [(R_l + R_2' / s)^2 + X_k^2]} \quad (2.26)$$

Як видно з (2.26), момент асинхронного двигуна залежить від квадрата напруги статора, тому АД дуже *чутливий* до зниження напруги живлення.

Вираз для пускового моменту двигуна отримується з (2.26) при ковзанні  $s=1$

$$M_n = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_c [(R_l + R_2')^2 + X_k^2]} \quad (2.27)$$

Функція (2.26) має точки екстремуму за ковзанням, які знаходяться з рівняння

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

Це критичне ковзання двигуна

$$s_{k1,2} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_l^2 + X_k^2}} \quad (2.28)$$

Критичному ковзанню відповідає критичний момент

$$M_{k1,2} = \pm \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c [\pm R_l + \sqrt{R_l^2 + X_k^2}]} \quad (2.29)$$

В рівняннях (2.28) та (2.29) знак “–” береться, якщо швидкість двигуна більша за синхронну швидкість  $\omega > \omega_c$ .

З урахуванням формул для критичного ковзання (2.28) та критичного моменту (2.29) рівняння моменту двигуна (2.26) перетворюється у формулу Клосса, яка використовується для аналітичної побудови механічних характеристик АД

$$M = \frac{2M_k \left(1 + s_k \frac{R_1'}{R_2}\right)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_1'}{R_2}} \quad (2.30)$$

Двигуни середньої та великої потужності мають значення опору  $R_1$  значно менше за інші електричні опори двигуна, тому воно часто нехтується  $R_1=0$  і формули критичного ковзання, моменту та Клосса значно спрощуються

$$s_k \approx \pm \frac{R_2'}{X_k}$$

$$M_k \approx \pm \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c X_k}$$

$$M \approx \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

та знаходиться простий вираз для знаходження критичного ковзання двигуна

$$s_k \approx s_n \left( \lambda \pm \frac{1}{\lambda} \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad (2.31)$$

де  $\lambda = M_k/M_n$  – відношення критичного моменту до номінального.

Механічна характеристика асинхронного двигуна представлена на рис. 2.16. Характерними точками механічної характеристики АД є:

- 1) Точка ідеального холостого ходу:  $M=0$ ,  $\omega=\omega_c$ ,  $s=0$ ;
- 2) Номінальна точка:  $M=M_n$ ,  $\omega=\omega_n$ ,  $s=s_n$ ;
- 3) Пускова точка (точка короткого замикання):  $M=M_n$ ,  $\omega=0$ ,  $s=1$ ;
- 4) Точка критичного (максимального) моменту:  $M=M_k$ ,  $s=s_k$ .

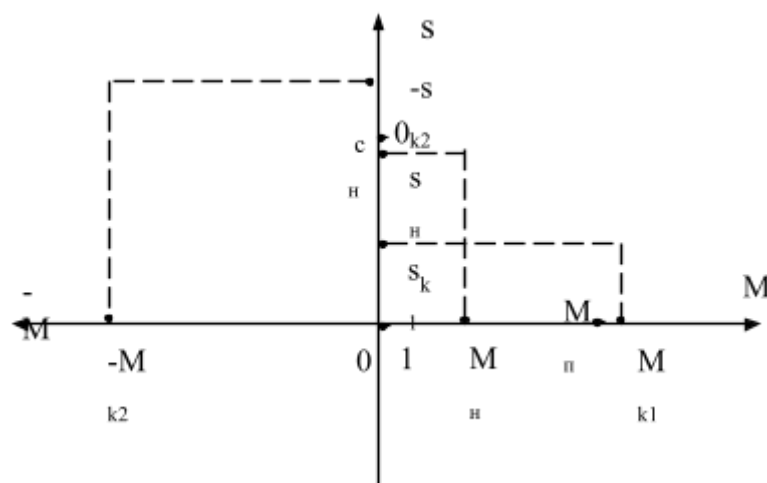


Рисунок 2.16 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

*Робочою ділянкою стійкої роботи* двигуна в усталеному режимі є частина механічної характеристики між критичними ковзаннями  $s_{k1}$  та  $s_{k2}$ . Синхронна швидкість поля  $\omega_c$  є швидкістю ідеального холостого ходу двигуна. Критичний момент  $M_k$  – це максимальний момент двигуна, який визначає його перевантажувальну здатність  $\lambda_M = M_k / M_n = 1,7 \div 3,4$ . Більші значення мають двигуни спеціального виконання, наприклад, для кранових механізмів. Згідно до (2.29) критичний момент у II квадранті більший, ніж у I квадранті  $M_{k2} > M_{k1}$ . Величина пускового моменту  $M_n$  залежить від величини активного електричного опору ротора  $R_2'$ , тому випускаються

двигуни з різною конструкцією короткозамкнених роторів, наприклад, із круглими та глибокими пазами, подвійною кліткою тощо, які забезпечують кратність пускового моменту  $\lambda_n = M_n / M_n = 1 \div 1,8$ . В порівнянні з двигунами постійного струму асинхронні двигуни мають невеликий пусковий момент, що є недоліком.

*Природна механічна характеристика* асинхронного двигуна відповідає його увімкненню на номінальну напругу  $U_1$  та частоту  $f_1$  статора при відсутності додаткових електричних опорів у колі ротора чи статора.

Для зміни моменту двигуна згідно формули (2.26) і відповідно для керування швидкістю існують наступні способи:

- 1) Зміна напруги статора  $U_1$ ;
- 2) Зміна частоти напруги статора  $f_1$ , в тому числі одночасно зі зміною напруги статора  $U_1$ ;
- 3) Зміна активного електричного опору кола ротора  $R'_2$  (тільки для двигунів із фазним ротором);
- 4) Зміна числа пар полюсів  $p$  (тільки для спеціальних двигунів, що дозволяють перемикання полюсів);
- 5) Використання енергії ковзання за допомогою спеціальних каскадних схем (тільки для двигунів із фазним ротором);
- 6) Подвійне живлення двигуна (тільки для двигунів із фазним ротором);
- 7) Зміна електричного опору кола статора  $R_1$  (для двигунів із короткозамкненим ротором при відсутності інших засобів).

1) Керування швидкістю за рахунок зміни напруги статора  $U_1$ .

Для реалізації способу керування двигун живиться від силового регулятора напруги (РН), який виготовляється на основі тиристорів чи симисторів (рис. 2.17).

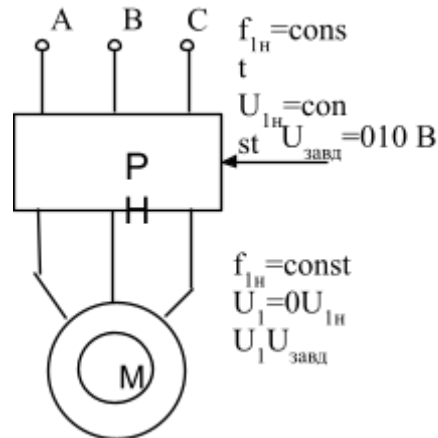


Рисунок 2.17 – Керування швидкістю за рахунок зміни напруги статора

Напруга статора врівноважується ЕРС статора та падінням напруги в колі статора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \quad (2.32)$$

Якщо знехтувати незначним значенням падіння напруги в статорі, то згідно до наведеної формули приблизно можна прийняти

$$U_1 \approx E_1$$

З формули для ЕРС статора  $E_1$  (2.19) знаходиться магнітний потік двигуна

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44 f_1 W_1 K_{w1}} \approx \frac{U_1}{4,44 f_1 W_1 K_{w1}} \quad (2.33)$$

Як видно із формули (2.33), для запобігання насичення магнітної системи двигуна напругу статора можна тільки *зменшувати* відносно номінальної  $U_{1н}$ , бо номінальний магнітний потік  $\Phi_n$  при проектуванні двигуна для отримання мінімальних габаритів задається близьким до потоку насичення  $\Phi_{нас}$  (рис. 2.18).

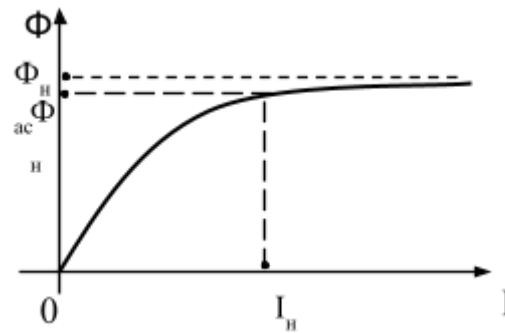


Рисунок 2.18 – Вибір робочої точки на кривій намагнічування  
Струм намагнічування  $I_{\mu}$  відповідно до раніше наведеної Г-подібної схеми заміщення пропорційно залежить від напруги статора  $U_1$ .

Зниження напруги статора не впливає на швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_c$  (2.17) та на критичне ковзання  $s_k$  (2.28), а тільки зменшує пропорційно квадрата напруги критичний момент  $M_k$  (2.29), тому всі штучні характеристики проходять через одну точку  $\omega_c$  та мають однакове критичне ковзання  $s_k$  (рис. 2.19).

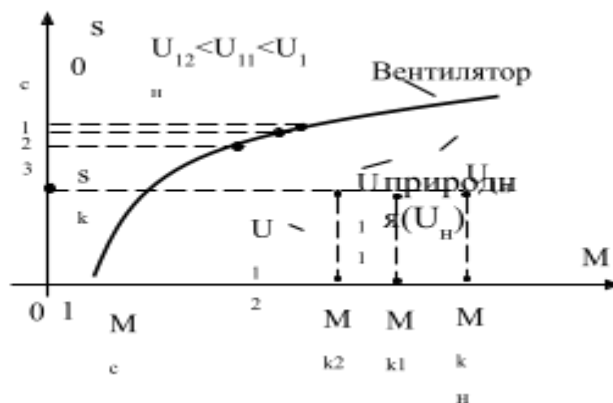


Рисунок 2.19 – Механічні характеристики при зміні напруги статора

Перевагою даного способу керування є можливість плавної зміни швидкості. Недоліком є суттєве зменшення перевантажувальної здатності двигуна пропорційно квадрата напруги та зниження жорсткості механічної характеристики, тобто збільшення ковзання двигуна. Це призводить до підвищення втрат у колі ротора пропорційно ковзанню

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s = P_1 s \quad (2.34)$$

тому цей спосіб використовується при невеликому діапазоні керування швидкості в межах 2-3, а також для короткочасного зниження швидкості та для запуску механізмів. Спосіб якнайкраще підходить для турбомеханізмів (вентиляторів, насосів тощо), момент опору яких залежить від квадрата швидкості. Розширення діапазону керування та підвищення жорсткості характеристик здійснюється за рахунок замкненої системи керування зі зворотним зв'язком за швидкістю.

2) Керування швидкістю за рахунок зміни частоти  $f_1$  та амплітуди  $U_1$  напруги живлення.

В цьому випадку обмотка статора двигуна живиться від силового перетворювача частоти, який реалізується на транзисторах чи тиристорах (рис. 2.20).

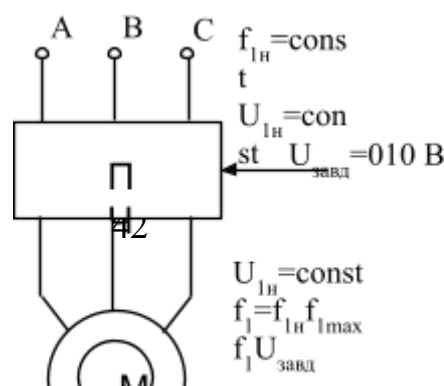


Рисунок 2.20 – Керування швидкістю за рахунок зміни частоти напруги

Якщо керування швидкістю здійснюється *тільки* зміною частоти  $f_1$ , то її згідно до (2.33) можна тільки збільшувати відносно номінальної  $f_{1n}$  для запобігання насичення магнітного кола двигуна. Збільшення частоти призводить до пропорційного збільшення синхронної швидкості  $\omega_c$  та до зменшення пропорційно квадрата частоти критичного моменту  $M_k$ , бо синхронна швидкість і індуктивний опір обмоток статора та ротора залежать від частоти

$$\begin{aligned} X_1 &= 2\pi f_1 L_1 \\ X_2' &= 2\pi f_1 s L_2' \end{aligned} \quad (2.35)$$

Жорсткість механічних характеристик на робочій ділянці не змінюється, бо пропорційному збільшенню синхронної швидкості відповідає пропорційне зменшення критичного ковзання. Сімейство штучних механічних характеристик представлено на рис. 2.21. Робочі точки визначаються перетином механічних характеристик двигуна та механізму, який створює статичний момент  $M_c$ .

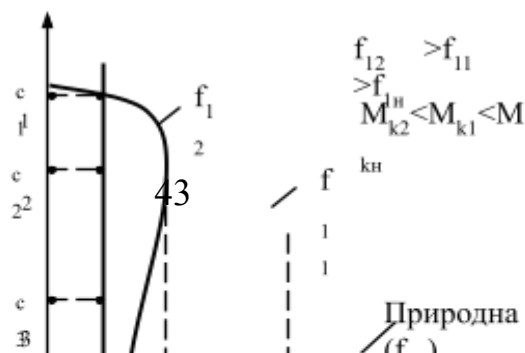


Рисунок 2.21 – Механічні характеристики при зміні частоти напруги

Перевагою способу є плавна зміна швидкості при незмінній жорсткості характеристик. Недолік полягає в зменшенні перевантажувальної здатності двигуна та можливості керування швидкістю тільки вище номінальної.

Якщо знехтувати активним електричним опором статора  $R_1=0$ , то критичний момент двигуна стає залежним у квадраті від напруги та частоти статора

$$M_k = K \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (2.36)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності.

Звідсіля випливає основний закон частотного керування швидкості асинхронного двигуна, який ще називається законом *Костенка*

$$\frac{U_{\#}}{f_{\#}} = \frac{U_1}{f_1} = const \quad (2.37)$$

Згідно до нього частота повинна змінюється пропорційно зміні напруги. Це забезпечує незмінне значення критичного моменту та незмінний номінальний магнітний потік (2.33) при широкому діапазоні керування швидкістю від нуля і до максимальної. Найчастіше в якості максимальної виступає номінальна швидкість, якій відповідає номінальна напруга статора. Підвищення напруги вище номінальної обмежується електричною стійкістю ізоляції обмотки. Сімейство штучних механічних характеристик, які мають паралельні робочі ділянки, представлено на рис. 2.22.

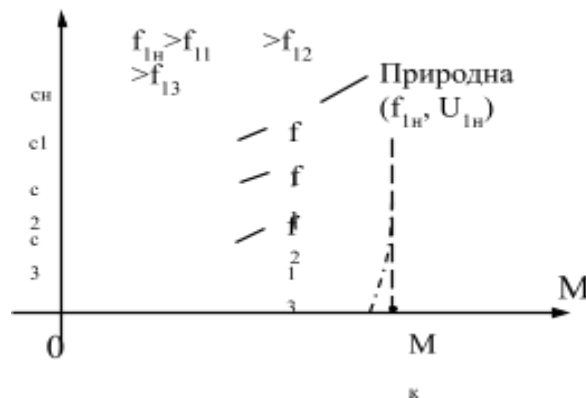


Рисунок 2.22 – Механічні характеристики при зміні частоти та амплітуди напруги за законом (2.37)

При низьких швидкостях падіння напруги в колі статора, яке нехтується при виводі закону керування, стає співвимірним із напругою живлення статора, що призводить до зменшення критичного моменту (крива лінія з точок на рисунку). Для виправлення недоліку на низьких швидкостях напругу потрібно зменшувати в меншій мірі, чим за законом

(2.37) або за допомогою замкненої системи керування підтримувати незмінним співвідношення ЕРС статора до частоти, щоб згідно (2.33) не змінювався магнітний потік. Крім того, при пуску двигуна, тобто при частоті близької до нульової, потрібне початкове значення напруги  $U_{10}$  для створення магнітного потоку і відповідно моменту двигуна. Для цього пуск починається з початкової частоти  $f_{10}=(1-3) \text{ Гц}$  та відповідного значення напруги  $U_{10}$ .

Для реалізації способу керування (2.37) найчастіше використовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму (рис. 2.23), які складаються з некерованого випрямляча (НВ), фільтра (Ф), автономного інвертора напруги (АІ) та системи керування (СК). Величина напруги живлення статора двигуна  $U_1$  та частоти  $f_1$  змінюється АІ за допомогою схеми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

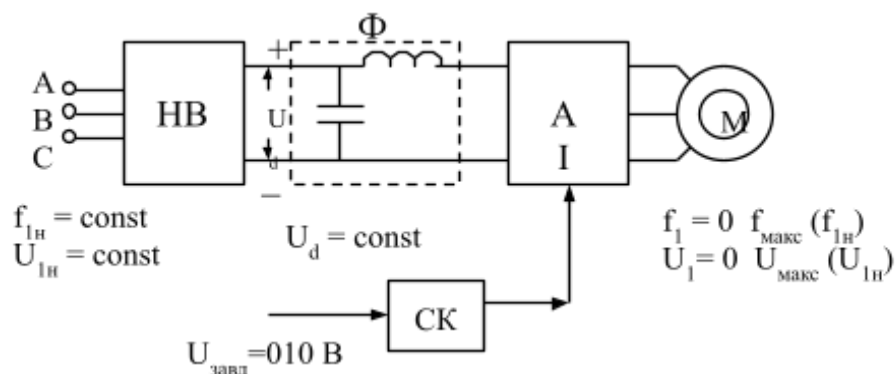


Рисунок 2.23– Функціональна схема перетворювача частоти

Розглянутий закон частотного керування (2.37) швидкості асинхронного двигуна є *основним*. Його перевагою є плавна зміна швидкості від нуля і до максимальної (номінальної) при незмінній жорсткості механічних характеристик та перевантажувальній здатності двигуна. Діапазон керування складає 5-10 для розімкнутих систем та 1000 і

більше для замкнених. Він називається “керування в першій зоні з постійним моментом двигуна”. Недолік полягає у відносній складності та підвищеній вартості перетворювача частоти.

Для турбомеханізмів (вентилятори, насоси тощо), статичний момент яких пропорційний квадрату швидкості  $M_c \cong \omega^2$ , найбільш економічним є такий закон частотного керування

$$\frac{U_{\#}}{f_{\#}^2} = \frac{U_1}{f_1^2} = const \quad (2.38)$$

при якому критичний момент двигуна зменшується пропорційно квадрата швидкості  $M_k \cong \omega^2$ , відтворюючи характер статичного моменту та зменшуючи магнітний потік і споживання реактивної енергії (рис. 2.24).

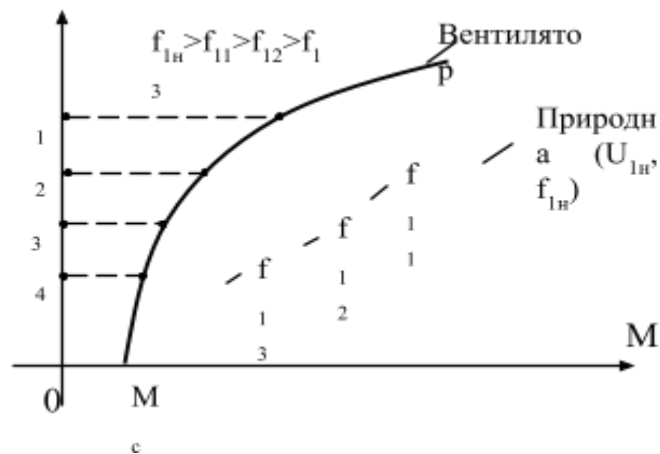


Рисунок 2.24 – Механічні характеристики при зміні частоти та амплітуди напруги за законом (2.38)

Для керування швидкістю із забезпеченням повної потужності двигуна, але з послабленням магнітного потоку і відповідно зменшенням критичного моменту двигуна застосовується закон керування

$$\frac{U_{\#}}{\sqrt{f_{\#}}} = \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const \quad (2.39)$$

При цьому момент двигуна змінюється обернено пропорційно, а синхронна швидкість пропорційно частоті, тому потужність, як їх добуток залишається незмінною. Напруга вище номінальної не піднімається і при подальшому збільшенні частоти вона залишається незмінною. Сімейство штучних механічних характеристик показано на рис. 2.25.

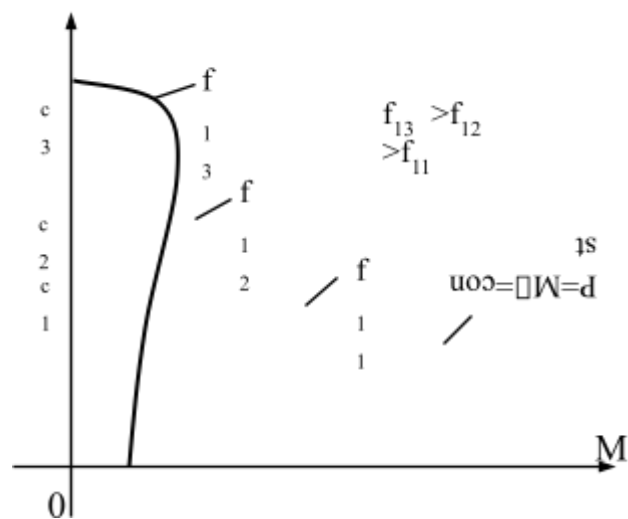


Рисунок 2.25 – Механічні характеристики при зміні частоти та амплітуди напруги за законом (2.39)

Розглянуті закони частотного керування швидкості асинхронного двигуна є найбільш поширеними. Розвиток елементної бази силової

промелектроніки та впровадження мікропроцесорних систем керування електроприводом суттєво зменшили вартість та габарити перетворювачів частоти, а також забезпечили високу якість керування, що обумовлює заміну нерегульованих асинхронних електроприводів на регульовані та витіснення з окремих галузей електроприводів постійного струму.

3) Керування швидкості за рахунок увімкнення *додаткового електричного резистора*  $R_{\delta}$  в коло ротора.

Для керування швидкості використовуються двигуни з фазним ротором, в коло ротора яких підключається трифазний реостат. Електричний опір реостата  $R_{\delta}$  за умовами комутації струму ротора змінюється ступенями шляхом замикання секцій силовими контактами  $K_i$  (рис. 2.26).

Сумарний приведений активний електричний опір кола ротора складається з приведенного електричного опору обмотки ротора  $R'_p$  та додаткового реостату  $R'_{\delta}$

$$R'_{\delta} = R'_{\delta} + R'$$

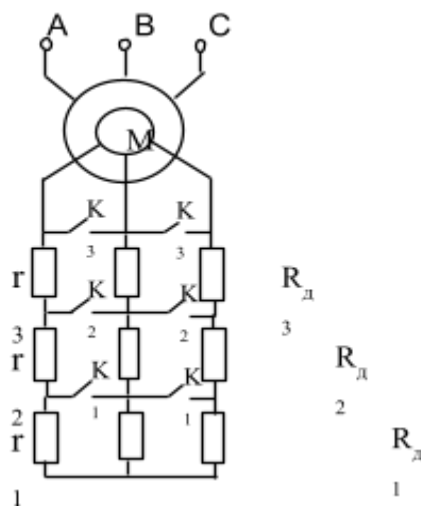


Рисунок 2.26 – Керування швидкістю за рахунок зміни електричного опору  
кола ротора

Синхронна швидкість  $\omega_c$  та критичний момент  $M_k$  не залежать від  $R'_2$ , тому всі штучні механічні характеристики проходять через одну точку ідеального холостого ходу. Критичне ковзання  $s_k$  збільшується із збільшенням  $R'_2$ , що призводить до зменшення жорсткості штучних характеристик

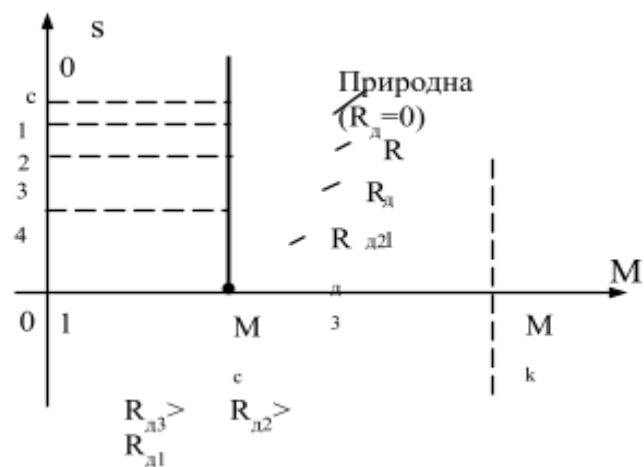


Рисунок 2.27 – Механічні характеристики при зміні електричного опору  
кола ротора

На основі відношення критичних ковзань на штучній  $s_{кш}$  та природній  $s_{кн}$  механічних характеристиках знаходиться критичне ковзання на штучній характеристиці

$$s_{ku} = s_{kn} \frac{R_p + R}{R_p} \quad (2.40)$$

чи величина додаткового опору, яка забезпечує потрібне критичне ковзання

$$R_{\partial} = R_p \left( \frac{s_{ku}}{s_k} - 1 \right) \quad (2.41)$$

Остання формула справедлива те тільки для відношень критичних ковзань, а і для відношень ковзань при будь-якому статичному моменті.

Перевагою даного способу керування є простота його реалізації та підвищення пускового моменту двигуна, який приймає максимальне значення при критичному ковзанні  $s_k = 1$ . Недоліки полягають у керуванні швидкістю ступенями, зменшенні жорсткості механічних характеристик, що призводить до різкого збільшення втрат у колі ротора пропорційно ковзанню (2,34) та до чутливості зміни навантаження. Це обмежує діапазон керування на рівні 1,5-2 для незмінного статичного моменту та 3-5 для моменту вентиляторного типу.

Увімкнення додаткового резистора в коло ротора застосовується також при керуванні швидкості двигуна за рахунок зміни напруги статора для збільшення пускового моменту. Використовуються також схеми з імпульсним регулюванням еквівалентного опору в колі ротора за допомогою широтно-імпульсної модуляції електронних ключів (ЕК) на тиристорах чи транзисторах (рис. 2.28).

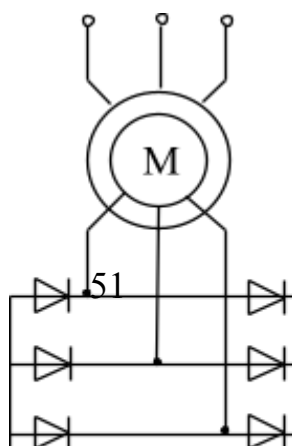


Рисунок 2.28 – Керування швидкістю за рахунок плавної зміни електричного опору кола ротора

Керування здійснюється зміною шпаруватості імпульсів у межах  $\nu=0-1$ . Це дозволяє плавно змінювати швидкість від  $\omega_{min}$  до  $\omega_{max}$ , проте додатковим недоліком є погіршення енергетичних показників електропривода через несинусоїдальність струмів двигуна

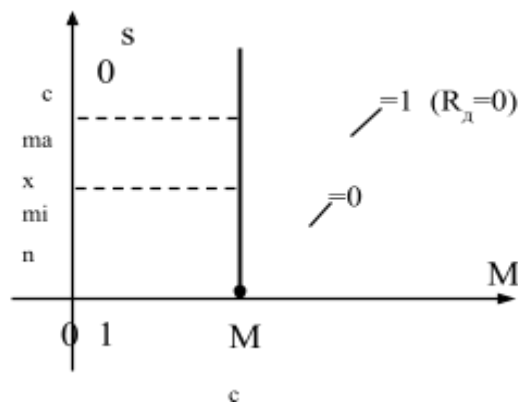


Рисунок 2.29 – Механічні характеристики при плавній зміні електричного опору кола ротора

4) Керування швидкості за рахунок зміни числа пар полюсів  $p$ .

Для зміни швидкості застосовуються спеціальні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які дозволяють змінювати число пар полюсів  $p$  шляхом перемикавання обмотки статора. Чим менше число пар полюсів, тим вища синхронна швидкість  $\omega_c$ . Так як число пар полюсів може бути тільки цілим: 1, 2, 3 тощо, то швидкість змінюється ступенями. Максимальна частота обертання, на яку випускаються двигуни широкого призначення, становить 3000 об/хв, а мінімальна – 500 об/хв. Найбільш поширені двошвидкісні двигуни, які мають одну обмотку статора розділену на дві частини. Виводи кожної частини позначені, як початок та кінець, наприклад,  $A_{1n}$  та  $A_{1k}$ . Серед багатьох схем з'єднання обмоток найчастіше використовуються схеми “зірка”, “трикутник” та “подвійна зірка” (рис. 2.30).

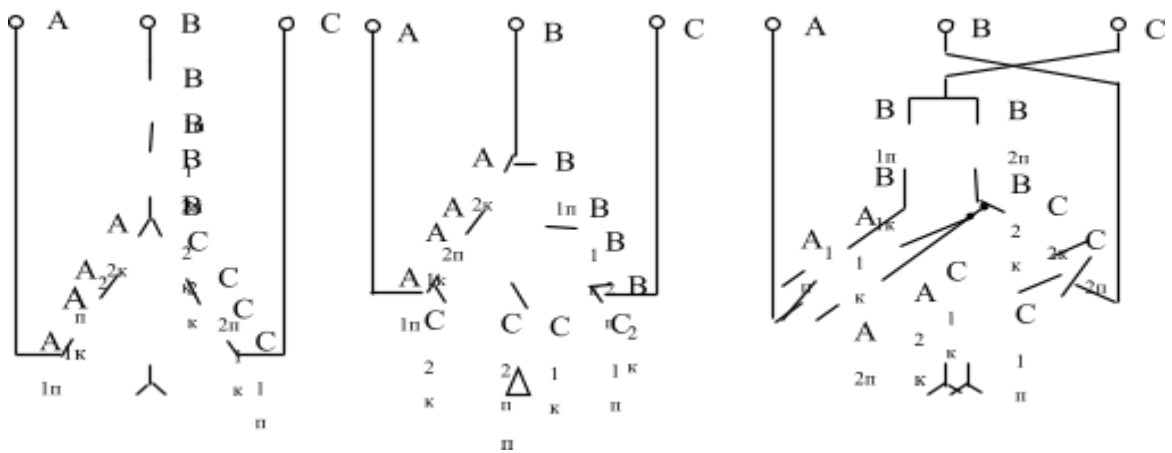


Рисунок 2.30 – Схеми з'єднання обмотки статора

Схема “подвійна зірка” забезпечує вдвічі менше пар полюсів, тому перемикавання з неї здійснюється на схемі “зірка” чи “трикутник” (рис. 2.31).

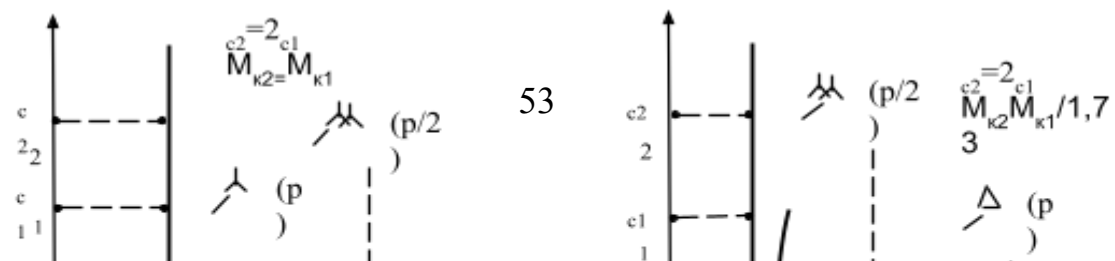


Рисунок 2.31 – Механічні характеристики при зміні числа пар полюсів

В першому випадку критичні моменти рівні, тому схема переключення “зірка/подвійна зірка” називається схемою з постійним моментом. В другому випадку критичні моменти відрізняються майже вдвічі – в 1,73 рази при подвійній різниці швидкостей, тому схема “трикутник/подвійна зірка” називається схемою з постійною потужністю, бо остання визначається добутком моменту й швидкості. Крім двошвидкісних застосовуються також три- та чотиришвидкісні двигуни. Тришвидкісні двигуни мають дві обмотки статора, одна з них постійно увімкнена у мережу, а друга перемикається, як у розглянутих двошвидкісних.

Перевагою способу є простота реалізації, незмінна та висока жорсткість механічних характеристик, висока економічність та надійність. Недоліком є зміна швидкості тільки ступенями та невеликий діапазон керування швидкістю 2-6, який визначається кількістю перемикаємих полюсів. Двигуни мають підвищені габарити та вартість. Завдяки своїм перевагам двигуни застосовуються в електроприводах вентиляторів, насосів, елеваторів, ліфтів, верстатів, в цементній та нафтовій галузях.

5) *Каскадні* схеми керування швидкості двигуна.

В роторі двигуна виділяються втрати, які можна використати для керування швидкістю. Втрати пропорційні ковзанню  $\Delta P_2 = P_1 s$  і в потужних двигунах, для яких застосовується цей спосіб, досягають значних величин. Керування швидкості здійснюється введенням у коло ротора додаткової ЕРС, тому для реалізації способу керування застосовуються двигуни з фазним ротором. В залежності від використання енергії ковзання розрізняються електричні та електромеханічні каскадні електроприводи. В електричних каскадах енергія ковзання повертається в мережу, а в електромеханічних на вал асинхронного двигуна. За типом пристроїв перетворення енергії ковзання каскади розділяються на електромашинні, вентильно-машинні та вентильні. Електромашинні каскади в теперішній час не використовуються.

З розвитком напівпровідникової техніки машинні елементи каскаду замінилися на електронні. Найпоширенішою є схема асинхронно-вентильного електричного каскаду (АВК), яка показана на рис. 2.32. Послідовно з діодним мостом увімкнено інвертор, який через узгоджувальний трансформатор  $Tr$  підключено до мережі. Інвертор створює ЕРС, за допомогою якої здійснює керування швидкості двигуна, та повернення енергію ковзання у мережу. Задана швидкість встановлюється сигналом завдання  $U_{завд}$  системи керування інвертором СКІ

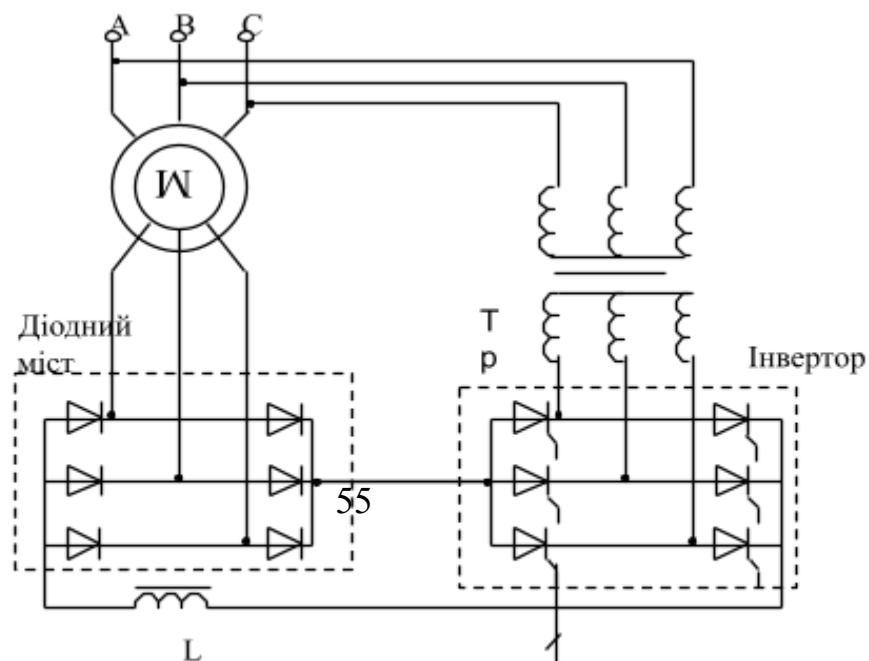


Рисунок 2.32 – Функціональна схема АВК

Механічні характеристики АВК приведено на рис. 2.33.

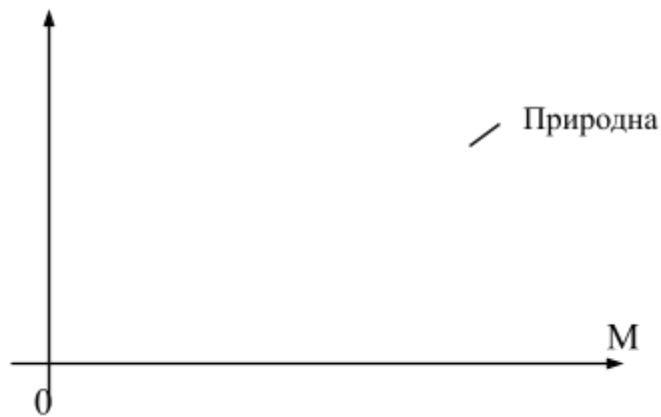


Рисунок 2.33 – Механічні характеристики АВК

Керування швидкості здійснюється майже при постійному моменті. При зменшенні швидкості перевантажувальна здатність двигуна зменшується на 10-15%. ККД цього каскаду більший, ніж у вентильно-машинних каскадах й складає 0,82-0,9, проте коефіцієнт потужності значно менший. Установлена потужність каскаду залежить від діапазону керування швидкості. Так при діапазоні рівному 2 потужність становить 250%, із них: 100% – АД і по 50% – діодний міст, інвертор, трансформатор. Розглянуті

каскадні схеми забезпечують однозонне керування вниз від номінальної швидкості .

б) Керування швидкості *подвійним живленням* двигуна.

Достатньо ефективні закони керування швидкістю можна отримати у двигуні подвійного живлення (ДПЖ), який також відноситься до каскадних систем електропривода, проте на відміну від розглянутої вище схеми, ДПЖ дозволяє змінювати напрямок потоку енергії у колі ротора, тобто не тільки перетворювати енергію ковзання від ротора, а й направляти в ротор додаткову електричну енергію (рис. 2.34).

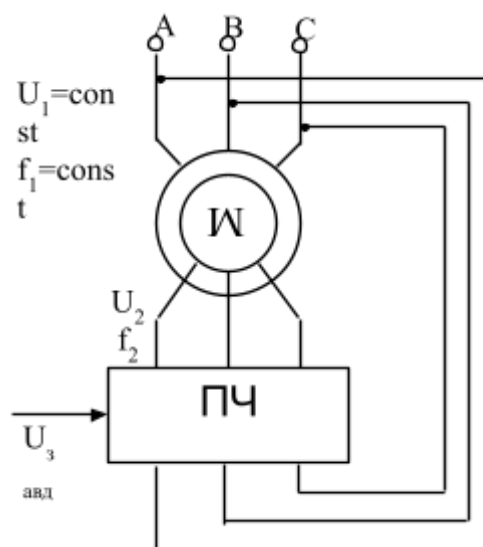


Рисунок 2.34 – Функціональна схема ДПЖ

Це забезпечує двозонне керування швидкістю, тобто як нижче так і вище номінальної. Для реалізації способу в коло ротора двигуна підключається перетворювач частоти. Проте основний недолік каскадних схем залишається, а саме, збільшення потужності перетворювача пропорційно діапазону керування швидкістю. При широкому діапазоні керування, коли потужності перетворювача й двигуна зрівнюються, раціональніше

застосовувати розглянуте частотне керування швидкістю, яке забезпечує кращу якість керування з використанням більш простішого двигуна з короткозамкненим ротором.

7) Керування швидкістю увімкненням *додавкового резистора в коло статора*.

Цей спосіб керування застосовується дуже рідко для двигунів із короткозамкненим ротором при відсутності інших засобів зменшити швидкість. Спосіб дуже неекономічний, тому використовується для короткочасної зміни швидкості. На рис 2.35 показано симетричне увімкнення додаткових резисторів  $R_{d1}$  у всі фази статора. Зміна опору здійснюється закорочуванням секцій реостата  $r_i$  контакторами  $K_i$ .

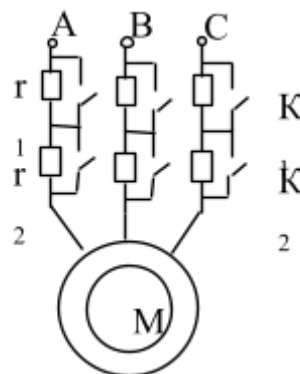


Рисунок 2.35 – Керування швидкістю за рахунок зміни електричного опору кола статора

Збільшення електричного опору кола статора  $R_{1\sigma} = R_1 + R_{d1}$  призводить до зменшення критичного ковзання, критичного та пускового моментів при незмінній синхронній швидкості (рис. 2.36).

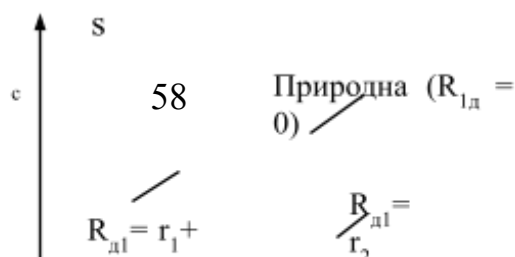


Рисунок 2.36 – Механічні характеристики при зміні електричного опору кола статора

Для зміни напрямку руху (*реверсу*) трифазного асинхронного двигуна потрібно змінити напрямок обертання магнітного поля статора. Для цього достатньо поміняти місцями будь-які два виводи обмотки статора (рис. 2.37).

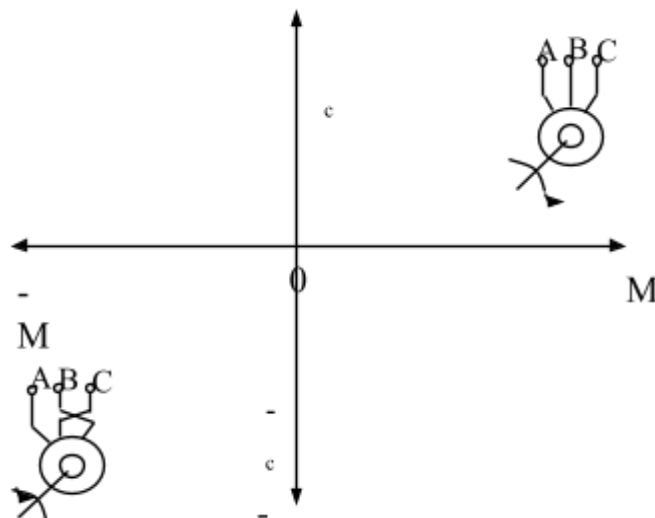


Рисунок 2.37 – Механічні характеристики при реверсі

Асинхронний двигун забезпечує наступні *режими гальмування*, які застосовуються для ефективного керування рухом:

- 1) Рекуперативне (генераторне) гальмування;
- 2) Гальмування противмиканням;
- 3) Динамічне гальмування;

1) Ознакою переходу в режим *рекуперативного гальмування* є більша за синхронну швидкість двигуна. Цей режим можна реалізувати в статичному режимі чи в перехідному процесі.

У статичному режимі за допомогою зовнішнього активного моменту  $M_c$  робоча точка переміщується в II чи IV квадранти (рис. 2.38).

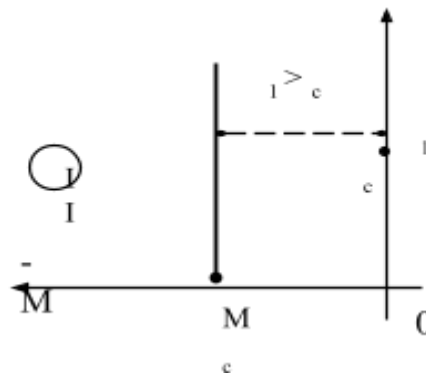


Рисунок 2.38 – Рекуперативне гальмування в усталеному режимі

У перехідному процесі двигун переходить у режим рекуперативного гальмування на ділянці 2-3 при зменшенні стрибком частоти живлення двигуна або при переключенні числа пар полюсів із більшої на меншу швидкість (рис. 2.39).

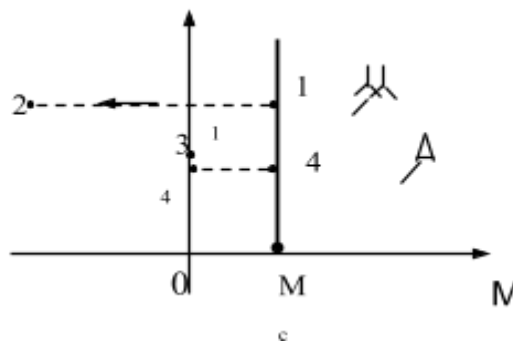


Рисунок 2.39 – Рекуперативне гальмування в перехідному процесі

В режимі рекуперативного гальмування двигун виробляє та повертає в мережу активну потужність, але при цьому продовжує споживати з мережі реактивну потужність. При частотному керуванні перетворювач повинен забезпечувати роботу в першому та другому квадрантах для нереверсивного електропривода та у всіх чотирьох для реверсивного.

2) Гальмування противмиканням у статичному режимі можна отримати тільки при активному статичному моменті для двигуна з фазним ротором. Для цього достатньо увімкнути в коло ротора додатковий резистор  $R_0$  із таким опором, щоб робоча точка перемістилася з I в IV квадрант. Величина опору визначає швидкість  $\omega_2$ , з якою буде обертатися двигун в режимі гальмування противмиканням (рис. 2.40).

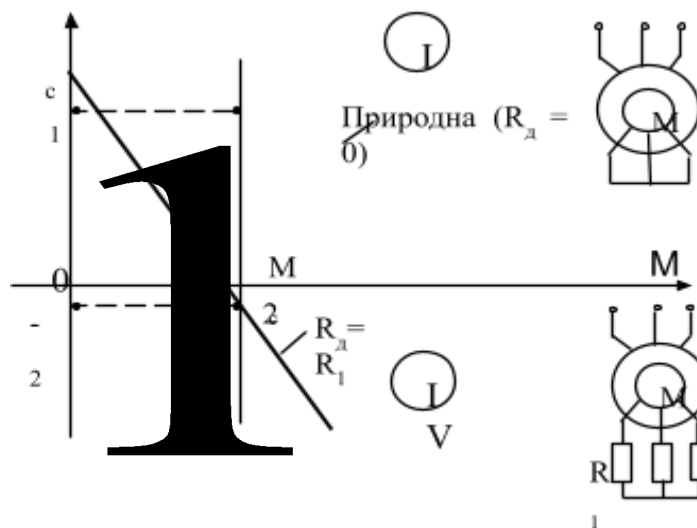


Рисунок 2.40 – Гальмування противмиканням в усталеному режимі

При реактивному статичному моменті цей режим можна отримати тільки в перехідному процесі. Для гальмування механізму здійснюється реверс двигуна. Для обмеження при гальмуванні струму та моменту статора двигуна з короткозамкненим ротором у його коло можуть бути увімкнені додаткові резистори. Якщо двигун із фазним ротором, то на хід

перехідного процесу та завдання початкового гальмівного моменту можна вплинути зміною додаткового опору  $R_d$  у колі ротора. На ділянці 2-3 механічної характеристики двигун буде сповільнюватися в режимі гальмування противмиканням. В точці 3 двигун потрібно відключити від мережі інакше він почне розганятись у зворотному напрямку, прямуючи до усталеної точки 6. Введення додаткового опору  $R_d$  у коло ротора дозволяє створювати умову, коли момент короткого замикання при зупинці в точці 5 буде меншим за статичний момент  $M_c$ , тому двигун не зможе розігнатися у зворотному напрямку й буде стояти під струмом. Його також потрібно відключити від живлення (рис. 2.41).

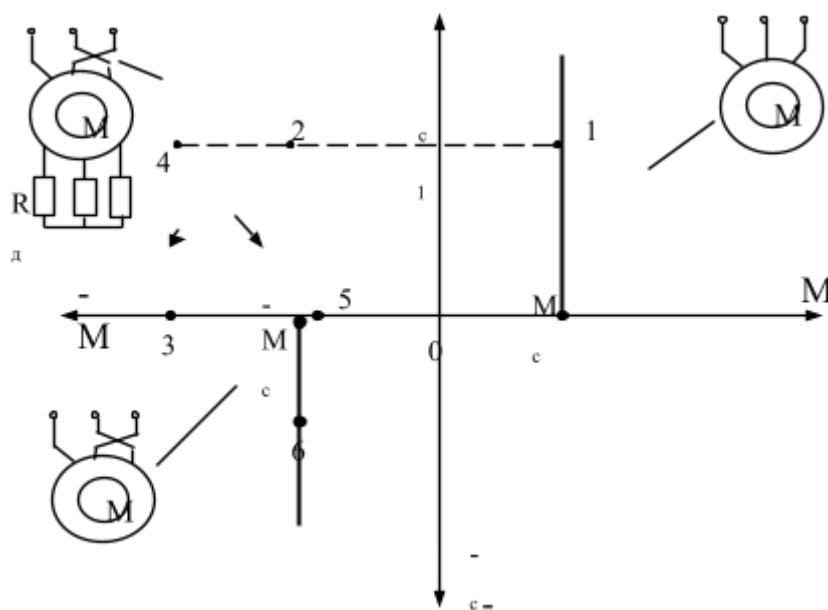


Рисунок 2.41 – Гальмування противмиканням в перехідному процесі

Перевагою гальмування противмиканням є створення значних моментів гальмування при низьких швидкостях. Недолік полягає у низькій енергетичній ефективності, так як двигун споживає електричну енергію з мережі та механічну від механізму й усю перетворює в тепло.

3) Для організації режиму *динамічного гальмування* потрібно джерело постійного струму. Обмотка статора працюючого двигуна відключається від мережі змінного струму і переключається на джерело постійного струму (рис. 2.42).

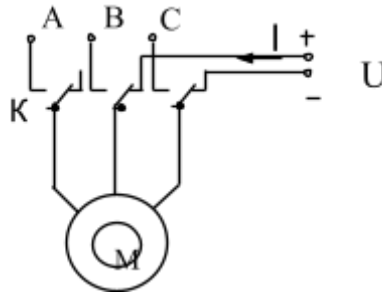


Рисунок 2.42 – Динамічне гальмування

При обертанні ротора двигуна в постійному магнітному полі, яке створює обмотка статора, виникає гальмівний момент. Так як обмотка статора трифазна, то при підключенні до джерела постійного струму використовуються різні схеми з'єднання фаз обмотки. При цьому постійний струм  $I$ , який протікає через обмотку статора, в залежності від схеми з'єднання відповідає еквівалентному змінному струмові  $I_{екв}$ , створюючи однакову за величиною магніторушійну силу. Цей еквівалентний струм визначає характерні точки механічної характеристики в режимі динамічного гальмування, а саме, критичний момент

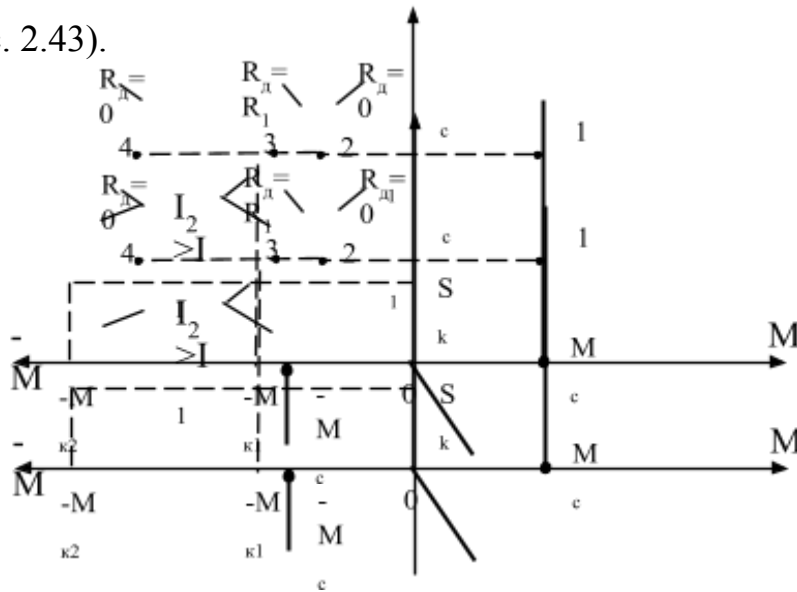
$$M_k = \frac{3I_{екв}^2 X_\mu^2}{2\omega_c (X_\mu + X'_2)} \quad (2.42)$$

та критичне ковзання

$$s_k = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (2.43)$$

де  $X_{\mu}$  – індуктивний опір взаємоіндукції.

Так як опір  $X_{\mu} \gg X_1$ , то критичне ковзання в режимі динамічного гальмування менше, чим в рушійному режимі, і відповідно жорсткість механічних характеристик буде більшою при однакових критичних моментах. Величину гальмівного моменту дуже просто задавати величиною постійного струму  $I$ , так як критичний момент (2.42) пропорційний квадрату струму. При цьому критичне ковзання (2.43) залишається незмінним. Якщо двигун із фазним ротором, то додатково на величину гальмівного моменту можна впливати введенням резистора  $R_{\partial}$  у коло ротора. Критичний момент залишиться незмінним, а збільшується критичне ковзання (2.43), бо  $R_p' = R_{\partial}' + R'$ , і тому зменшується жорсткість штучних механічних характеристик, які всі проходять через початок координат (рис. 2.43).



## Рисунок 2.43 – Механічні характеристики при динамічному гальмуванні

Після вмикання режиму гальмування з робочої точки 1 двигун сповільнюється до зупинки при реактивному статичному моменті на ділянках характеристик 2-0, 3-0 чи 4-0 у залежності від величини струму  $I$  чи додаткового опору в роторі  $R_d$ . Якщо ж статичний момент активний, то після зупинки двигун почне розганятися в протилежному напрямку до нової робочої точки в четвертому квадранті.

Перевагою способу є простота керування гальмівним моментом, а недоліком – незначна величина гальмівного моменту при низьких швидкостях.

### 2.6 Методика розрахунку потужності двигуна

Електричний двигун головного електропривода робочої машини з маховиком, яка використовується в даній розрахунковій роботі, працює в режимі S1. Спрощена кінематична схема машини складається з повзуна 1, кривошипно-шатунної передачі 2, головного валу 3, маховика 4, ремінної передачі 5 та електродвигуна 6 (рис. 2.44).

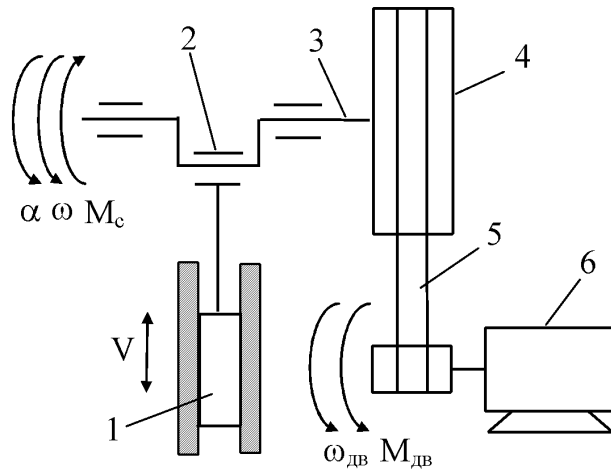


Рисунок 2.44 – Кінематична схема робочої машини

Робота електропривода характеризується різкою та періодичною зміною моменту навантаження  $M_c$  у залежності від кута повороту  $\alpha$  головного валу. Момент робочої операції  $M_{оп}$  перевершує момент холостого ходу  $M_{хх}$  в 10-15 разів (рис. 2.45).

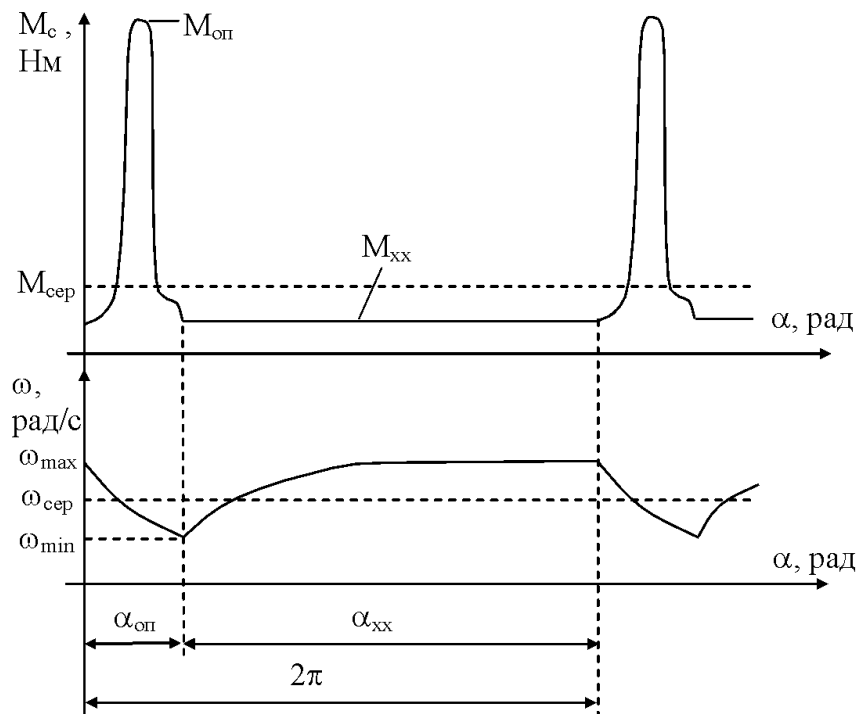


Рисунок 2.45 – Діаграма навантаження та тахограма

При виконанні операції швидкість головного валу  $\omega$  зменшується до  $\omega_{min}$ , а під час холостого ходу знову відновлюється до  $\omega_{max}$ . Середня швидкість валу дорівнює

$$\omega_{cp} = \frac{\omega_{min} + \omega_{max}}{2} \quad (2.44)$$

і визначається числом ходів за хвилину  $n_{xd}$  машини

$$\omega_{cp} = \frac{\pi n_{xd}}{30} \quad (2.45)$$

Внаслідок невеликого значення кута операції  $\alpha_{on}=(15-40)^\circ$  відносно повного кута повороту валу, їх відношення  $\alpha_{on}/2\pi$  є незначним, тому реальний графік статичного моменту замінюється на прямокутний і обчислюється середній момент навантаження

$$M_{cp} = \frac{M_{on}\alpha_{on} + M_{xx}\alpha_{xx}}{2\pi} = \frac{A_{on} + A_{xx}}{2\pi} \quad (2.46)$$

де  $A_{on}$ ,  $A_{xx}$  – повна робота операції та робота холостого ходу машини.

На основі (2.45) та (2.46) знаходиться розрахункова потужність двигуна головного електропривода

$$P = kM_{cp}\omega_{cp} / \eta \quad (2.47)$$

де  $k=1,2-1,6$  – коефіцієнт запасу, значення якого вибирається

у залежності від продуктивності машини (табл. 2.3);

$\eta$  – ККД механічної передачі.

З довідника вибирається двигун найближчої більшої потужності, частота обертання якого визначається числом ходів машини  $n_{xd}$  та передаточним числом кінематичного ланцюга  $i$

$$n_{dv} = n_{xd}i \quad (2.48)$$

Момент інерції маховика обчислюється за площею на діаграмі навантаження, розташованою вище середнього моменту  $i$  яка визначає енергію, що віддає маховик

$$J_m = \frac{M_{on}\alpha_{on}}{\delta\omega_{cp}^2} \quad (2.49)$$

де  $\delta = (\omega_{vnx} - \omega_{min}) / \omega$  – нерівномірність ходу головного валу.

Як видно з (2.49), збільшення нерівномірності ходу дозволяє зменшити момент інерції маховика, проте одночасно збільшуються втрати у двигуні і зменшується ККД усієї машини. Рациональне значення нерівномірності ходу становить

$$\delta = 2s_n k \xi \quad (2.50)$$

і визначається продуктивністю машини відповідно до даних табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Параметри рационального значення нерівномірності ходу

Параметр	Число ходів за хвилину $n_{хд}$		
	до 15	15-50	більше 50
$s_n$ – рекомендоване ковзання двигуна	0,12-0,08	0,08-0,04	0,04-0,02
$k$ – коефіцієнт запасу у формулах (45) і (48)	1,2	1,3	1,4-1,6
$\xi$ – коефіцієнт, що враховує тертя	0,85	0,9	0,95

Приведений до валу двигуна момент інерції маховика в декілька десятків разів більше за момент інерції двигуна, тому пуск головного електропривода машини носить затяжний характер.

## 2.7 Приклади типових розрахунків

Приклад 1. Розрахувати потужність та вибрати асинхронний двигун головного електропривода робочої машини з маховиком. Знайти необхідний момент інерції маховика машини.

Дано:  $A_{on}=14000$  Дж – повна робота операції машини;  $A_{xx}=1160$  Дж – робота холостого ходу машини;  $n_{xd}=70$  ход/хв – число ходів машини;  $i=13$  – передаточне число редуктора та ремінної передачі;  $\eta=0,9$  – ККД механічної передачі.

Розв'язок: Середній момент навантаження

$$M_{cp} = \frac{A_{on} + A_{xx}}{2\pi} = \frac{1400 + 1160}{2 \cdot 3,14} = 2412,86 \text{ Нм}$$

Середня швидкість головного валу

$$\omega_{cp} = \frac{\pi n_{xd}}{30} = \frac{3,14 \cdot 70}{30} = 7,33 \text{ рад/с}$$

Розрахункова потужність електродвигуна

$$P_{\text{вм}} = \frac{kM_{cp} \omega_{cp}}{\eta} = \frac{1,4 \cdot 2412,86 \cdot 7,33}{0,9} = 27500 \text{ Вт}$$

Частота обертання електродвигуна

$$n_{\text{об}} = n_{xd} \cdot i = 70 \cdot 13 = 910$$

З довідника вибирається асинхронний електродвигун найближчої більшої потужності з наступними основними паспортними даними:  $P_n=28$  кВт – номінальна потужність;  $n_c=1000$  об/хв – синхронна частота обертання;  $s_n=0,025$  – номінальне ковзання.

Рациональне значення нерівномірності ходу головного валу

$$\delta = 2s_n k\xi = 2 \cdot 0,025 \cdot 1,4 \cdot 0,95 = 0,0665$$

Момент інерції маховика

$$J_M = \frac{A_{on}}{\delta \omega_{cp}^2} = \frac{14000}{0,0665 \cdot 7,33^2} = 3918 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$$

*Відповідь.*  $P_n=28$  кВт;  $J_M=3918$  кг\*м<sup>2</sup>.

Приклад 2. Розрахувати для I-го квадранту природну та три штучні механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором при зменшенні напруги статора  $U_1=0,8U_{1n}$ , при зменшенні напруги і частоти статора за співвідношенням  $U_1/f_1 = U_{1n}/f_{1n}$  та при введенні в коло ротора додаткового реостата з електричним опором  $R_d=0,02R_n$ .

*Дано:*  $P_n=17,5$  кВт – номінальна потужність двигуна;  $n_n=945$  об/хв – номінальна частота обертання;  $U_{1n}=380$  В – номінальна напруга статора;  $f_{1n}=50$  Гц – номінальна частота напруги статора;  $R_1=0,34$  Ом – активний електричний опір обмотки статора;  $x_1=0,43$  Ом – індуктивний електричний опір обмотки статора;  $R_2=0,12$  Ом – активний електричний опір обмотки

ротора;  $x_2=0,25 \text{ Ом}$  – індуктивний електричний опір обмотки статора;  $k_e=2,66$  – коефіцієнт трансформації;  $E_{2н}=310 \text{ В}$  – номінальна ЕРС ротора;  $I_{2н}= 36 \text{ А}$  – номінальний струм обмотки ротора;  $p=3$  – кількість пар полюсів; схема з'єднання обмотки статора – „зірка”.

*Розв'язок:* Розрахунок механічних характеристик двигуна у форматі  $\omega=f(M)$  чи  $s=f(M)$  здійснюється за формулою Клосса

$$M = \frac{2M_k(1 + s_k \frac{R_l}{R_2})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_l}{R_2}}$$

і залежністю швидкості двигуна від ковзання

$$\omega = \omega_c(1 - s)$$

Спочатку обчислюються параметри цих формул для *природної* характеристики. Синхронна швидкість двигуна дорівнює

$$\omega_c = \frac{2\pi f_{\#}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ с}^{-1}$$

Приведений активний електричний опір обмотки ротора

$$R_{2M} = R_2 k_e^2 = 0,12 \cdot 2,66^2 = 0,85$$

Приведений індуктивний електричний опір обмотки ротора

$$X_2' = x_2 k_e^2 = 0,25 \cdot 2,66^2 = 1,77$$

Сумарний індуктивний опір обмоток двигуна

$$X_k' = x_1 + x_2' = 0,43 + 1,77 = 2,2$$

Критичне ковзання (36) для I-го квадранту береться із знаком „+”

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k'^2}} = \frac{0,85}{\sqrt{0,34^2 + 2,2^2}} = 0,38$$

Критичний момент (37) для I-го квадранту також береться із знаком „+”. Крім того, при з'єднанні обмотки статора в схему „зірка” фазна

напруга дорівнює  $U_\phi = U_{lн} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220$  В

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k'^2}]} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 (0,34 + \sqrt{0,34^2 + 2,2^2})} = 270,2$$

Номінальна кутова швидкість двигуна

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 945}{30} = 98,6 \text{ c}^{-1}$$

Номинальне ковзання двигуна

$$s_n = \frac{\omega_a - \omega}{\omega_c} = \frac{104,7 - 98,9}{104,7} = 0,055$$

Після проведених обчислень формула Клосса для знаходження моменту двигуна приймає такий вигляд

$$M = \frac{2M_k(1 + s_k \frac{R_1}{R_2})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_1}{R_2}} = \frac{2 \cdot 270,2(1 + 0,38 \frac{0,34}{0,85})}{\frac{s}{0,38} + \frac{0,38}{s} + 2 \cdot 0,38 \frac{0,34}{0,85}} = \frac{622,5}{\frac{s}{0,38} + \frac{0,38}{s} + 0,304} \quad (2.51)$$

а залежність для визначення швидкості двигуна наступний

$$\omega = \omega_c(1 - s) = 104,7(1 - s) \quad (2.52)$$

Для обчислення *природної* механічної характеристики у I-му квадранті задаються значеннями ковзання в межах від  $s=0$  до  $s=1$  та за формулами (2.51), (2.52) знаходяться момент і швидкість двигуна. Для зручності результати обчислень розміщуються у наступній таблиці

s	M, Нм	$\omega$ , рад/с
---	-------	------------------

0	0	104,7
0,01	16,2	103,7
0,02	32,2	102,6
0,04	62,8	100,5
0,055	84,6	98,9
0,1	142,5	94,2
0,2	228,0	83,8
0,3	263,8	73,3
0,38	270,2	64,9
0,5	261,6	52,4
0,6	247,4	41,9
0,7	231,5	31,4
0,8	215,8	20,9
0,9	201,2	10,5
1,0	187,8	0

За даними цієї таблиці будується графік природної механічної характеристики асинхронного двигуна у форматі  $\omega=f(M)$  та  $s=f(M)$ .

Для обчислення *штучних* механічних характеристик розраховуються заново тільки ті аргументи формули Клосса і швидкості, що залежать від змінених параметрів двигуна. Всі інші аргументи, що не змінюються, беруться із розрахунків для природної характеристики.

Для обчислення *першої штучної* механічної характеристики при зменшенні напруги статора до рівня  $U_1=0,8U_{1n}$  розраховується заново критичний момент, бо тільки він залежить від напруги

$$M_M = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c [R_l + \sqrt{R_l^2 + X_k^2}]} = \frac{3 \cdot 176^2}{2 \cdot 104,7 (0,34 + \sqrt{0,34^2 + 2,2^2})} = 173$$

де  $U_\phi = 0,8U_{1n} / \sqrt{3} = 0,8 \cdot 380 / \sqrt{3} = 176$  В – нове значення фазної напруги.

Після цього формула Клосса приймає наступний вигляд

$$M = \frac{2M_k(1 + s_k \frac{R_1}{R_2})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_1}{R_2}} = \frac{2 \cdot 173(1 + 0,38 \frac{0,34}{0,85})}{\frac{s}{0,38} + \frac{0,38}{s} + 2 \cdot 0,38 \frac{0,34}{0,85}} = \frac{398,6}{\frac{s}{0,38} + \frac{0,38}{s} + 0,304} \quad (2.53)$$

Залежність для визначення швидкості двигуна залишається незмінною

$$\omega = \omega_c(1 - s) = 104,7(1 - s) \quad (2.54)$$

Аналогічно як для природної характеристики за формулами (2.53), (2.54) знаходяться момент і швидкість двигуна. Результати обчислень подано в наступній таблиці

s	M, Нм	$\omega$ , рад/с
0	0	104,7
0,01	10,4	103,7
0,02	20,6	102,6
0,04	40,2	100,5
0,055	54,2	98,9
0,1	91,3	94,2
0,2	146,0	83,8
0,3	168,9	73,3
0,38	173,0	64,9
0,5	167,5	52,4

0,6	158,4	41,9
0,7	148,2	31,4
0,8	138,2	20,9
0,9	128,8	10,5
1,0	120,2	0,0

За даними таблиці будується графік штучної механічної характеристики асинхронного двигуна у форматі  $\omega=f(M)$  та  $s=f(M)$  при зменшенні напруги статора до рівня  $U_1=0,8U_{1н}$ .

Для обчислення *другої штучної* механічної характеристики при зменшенні напруги статора до рівня  $U_1=0,8U_{1н}$  і частоти за співвідношенням  $U_1/f_1 = U_{1н}/f_{1н}$  розраховуються заново ті параметри, які залежить від напруги та частоти.

Нове значення частоти напруги статора знаходиться із заданого співвідношення

$$f_{1ш} = \frac{U_{1ш} f_1}{U_{1ш}} = \frac{0,8 U_{1н} f}{U_{1н}} = 0,8 f_1 = 0,8 \cdot 50 = 40$$

Нове значення синхронної швидкості двигуна дорівнює

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40}{3} = 83,77 \text{ рад/с}$$

Сумарний індуктивний опір обмоток двигуна також залежить від частоти і його нове значення знаходиться на основі пропорції із відомим значенням для природної характеристики  $x_{kn}=2,2 \text{ Ом}$

$$Q_M = \frac{x_k f_l}{f_{\text{ш}}} = \frac{2,2 \cdot 40}{50} = 1,76$$

Нове значення критичного ковзання становить

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{0,85}{\sqrt{0,34^2 + 1,76^2}} = 0,474$$

Нове значення критичного моменту дорівнює

$$M_M = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_c [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]} = \frac{3 \cdot 176^2}{2 \cdot 83,7 (0,34 + \sqrt{0,34^2 + 1,76^2})} = 260,3$$

Після цього залежність для визначення швидкості двигуна приймає такий вигляд

$$\omega = \omega_c (1 - s) = 83,7 (1 - s) \quad (2.55)$$

а формула Клосса наступний

$$\begin{aligned} M &= \frac{2M_k (1 + s_k \frac{R_1'}{R_2})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_1'}{R_2}} = \\ &= \frac{2 \cdot 260,3 (1 + 0,474 \frac{0,34}{0,85})}{\frac{s}{0,474} + \frac{0,474}{s} + 2 \cdot 0,474 \frac{0,34}{0,85}} = \frac{619,3}{\frac{s}{0,474} + \frac{0,474}{s} + 0,379} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Аналогічно як для попередніх характеристик за формулами (2.55), (2.56) знаходяться момент і швидкість двигуна

s	M, Нм	$\omega$ , рад/с
0	0	83,7
0,01	13,0	82,9
0,02	25,7	82,0
0,04	50,3	80,4
0,06	73,7	78,7
0,1	116,2	75,3
0,2	195,3	67,0
0,3	238,9	58,6
0,4	257,2	50,2
0,474	260,3	44,0
0,6	254,4	33,5
0,7	244,5	25,1
0,8	232,9	16,7
0,9	220,8	8,4
1,0	209,0	0,0

За даними таблиці будується графік штучної механічної характеристики асинхронного двигуна  $\omega=f(M)$  при зменшенні напруги статора до рівня  $U_1=0,8U_{1н}$  і частоти за співвідношенням  $U_1/f_1=U_{1н}/f_{1н}$ .

Для обчислення *третьої штучної* механічної характеристики при введенні в коло ротора додаткового реостата з електричним опором  $R_\delta=0,02R_n$  розраховується заново критичне ковзання, бо тільки воно залежить від цього опору.

Номинальний електричний опір асинхронного двигуна

$$\varrho_M = \frac{E_2}{\sqrt{3}I_2} = \frac{310}{\sqrt{3} \cdot 36} = 4,98$$

Приведений електричний опір додаткового резистора

$$\varrho'_M = 0,02R_n k_e^2 = 0,02 \cdot 4,98 \cdot 2,66^2 = 0,7$$

Нове значення критичного ковзання становить

$$s_k = \frac{R'_d + R'}{\sqrt{R_l^2 + X_k^2}} = \frac{0,85 + 0,7}{\sqrt{0,34^2 + 2,2^2}} = 0,7$$

Після цього формула Клосса приймає наступний вигляд

$$\begin{aligned} M &= \frac{2M_k(1 + s_k \frac{R_l}{R_2})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_l}{R_2}} = \\ &= \frac{2 \cdot 270,2(1 + 0,7 \frac{0,34}{0,85})}{\frac{s}{0,7} + \frac{0,7}{s} + 2 \cdot 0,7 \frac{0,34}{0,85}} = \frac{691,7}{\frac{s}{0,7} + \frac{0,7}{s} + 0,56} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Залежність для визначення швидкості двигуна залишається незмінною

$$\omega = \omega_c(1 - s) = 104,7(1 - s) \quad (2.58)$$

Аналогічно як для природної характеристики знаходяться момент і швидкість двигуна. Результати обчислень подано в таблиці.

s	M, Нм	$\omega$ , рад/с
0	0	104,7
0,01	9,8	103,7
0,02	19,4	102,6
0,04	38,2	100,5
0,06	56,2	98,4
0,1	89,8	94,2
0,2	159,2	83,8
0,3	208,2	73,3
0,4	240,1	62,8
0,5	258,6	52,4
0,6	267,7	41,9
0,7	270,2	31,4
0,8	268,3	20,9
0,9	263,7	10,5
1,0	257,3	0,0

За даними таблиці будується графік штучної механічної характеристики асинхронного двигуна у форматі  $\omega=f(M)$  та  $s=f(M)$  при введенні в коло ротора додаткового реостата з електричним опором  $R_d=0,02R_n$ .

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Паначевський Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка. Теорія і практикум: Підручник. – К.: Каравела, 2004. – 440 с.
2. Яцун М.А. Електричні машини: Підручник. – Львів: Вид-во "Львівська політехніка", 2011. – 464 с.
3. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
4. Монтік П.М. Електротехніка та електромеханіка: Навчальний посібник. – Львів: Вид-во "Новий світ-2000", 2007. – 500 с.
5. Акимов Л.В., Качанов П.А., Черенов А.Н. Автоматизированный электропривод: элементы, теория, системы управления. 3000 вопросов для самостоятельного обучения и контроля знаний. – Харьков: Издательство "Підручник НТУУ "ХПІ", 2011. – 532 с.
6. Брускин Д.Э., Зохорович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины: Учебник. – М.: Высшая школа, 1990. – 402 с.
7. Электротехника: Учебное пособие / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1983. – 480 с.
8. Справочник по электрическим машинам: Т.1. / Под общ. ред. И.П.Копылова и Б.К.Клокова. – М. Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
9. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
10. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие для вузов / М.Ю.Анвельт, В.Г.Герасимов, В.П.Данильченко и др.; Под ред. В.С.Пантюшина. – М: Высшая школа, 1979. – 253 с.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Кафедра теоретичної електротехніки

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА  
з кредитного модуля  
“ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД”

Перевірив:  
доктор технічних наук,  
професор Островерхов М.Я.

Виконала:  
студентка групи ЛА-31  
Захарчук А.С.

Київ 2018