

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

До друку і в світ дозволяю

Проректор

Гладкий І.П.

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до контрольної роботи з дисципліни  
«Теорія електроприводу»  
для студентів заочної форми навчання за напрямом  
підготовки «Електромеханіка» 6.050702

Всі цитати, цифровий,  
фактичний матеріал  
і бібліографічні  
відомості перевірені,  
написання одиниць  
відповідає стандартам

Затверджено  
методичною радою  
університету.  
Протокол № 1  
від 5.10.2011

Укладачі:

А.В. Гнатов  
О.А. Дзюбенко  
І.С. Трунова

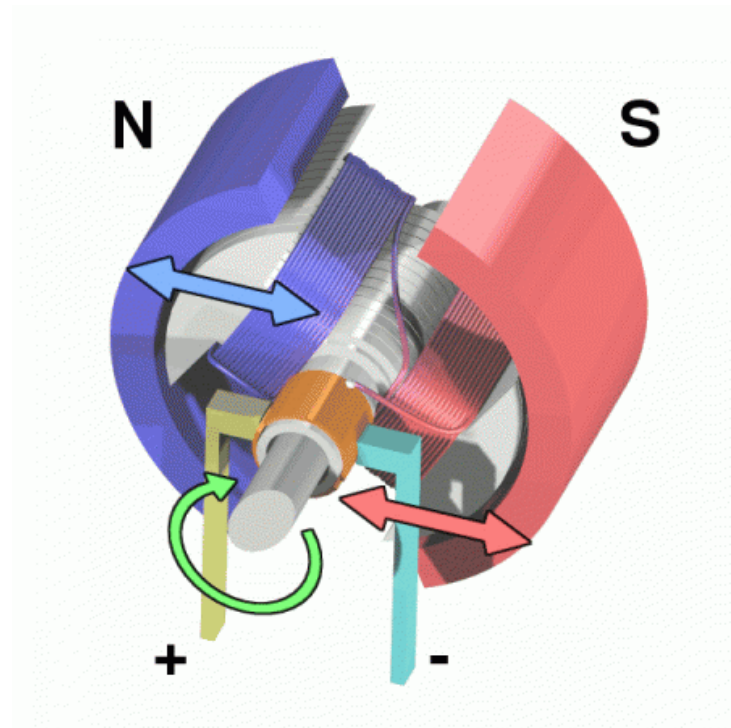
Відповідальний за випуск

О.В. Бажинов

Харків ХНАДУ 2012

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

А.В. Гнатов, О.А. Дзюбенко, І.С. Трунова



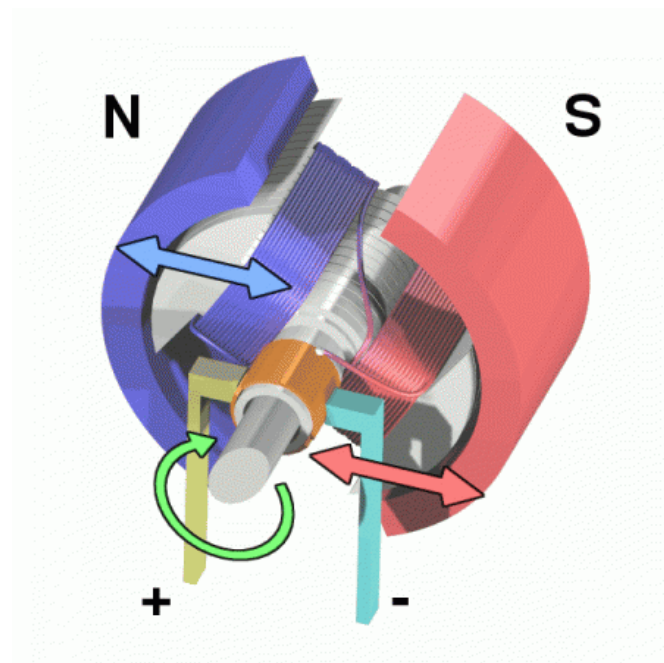
## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до контрольної роботи з дисципліни  
«Теорія електроприводу»  
для студентів заочної форми навчання за напрямом підготовки  
«Електромеханіка» 6.050702

Харків 2012

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

А.В. Гнатов, О.А. Дзюбенко, І.С. Трунова



## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до контрольної роботи з дисципліни  
«Теорія електроприводу»  
для студентів заочної форми навчання за напрямом підготовки  
«Електромеханіка» 6.050702

Затверджено методичною  
радою університету,  
Протокол № 1 від 5.10.2011

Харків 2012  
ХНАДУ  
2012

Укладачі: А.В. Гнатов  
О.А. Дзюбенко  
І.С. Трунова

Кафедра автомобільної електроніки

Теорія електроприводу

Методичні вказівки до контрольної роботи для студентів заочної форми навчання за напрямом підготовки «Електромеханіка» 6.050702

/ А.В. Гнатов, О. А. Дзюбенко, І.С. Трунова. – Х.: ХНАДУ, 2012. – 44 с.

Методичні вказівки до контрольної роботи з дисципліни «Теорія електроприводу» містять: завдання до контрольної роботи, хід розв'язання контрольної роботи та теоретичний матеріал, необхідний для осмисленого виконання роботи студентами при вивченні даної дисципліни. Завдання виконуються студентами у відповідності до заданого варіанту.

Ілюстрацій – 17, таблиць – 4, бібліографія – 13 найменувань



## ЗМІСТ

1. ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ» .....	4
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ .....	8
2.1 Приведення моментів і сил опору, інерційних мас і моментів інерції .....	7
2.2 Моменти опору, їх види .....	9
2.3 Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження в гальмівних режимах .....	16
2.4 Гальмування з віддачею енергії в мережу .....	17
2.5 Динамічне гальмування .....	19
2.6 Гальмування протиковмиканням .....	20
2.7 Рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна .....	25
2.8 Механічні характеристики асинхронного двигуна .....	30
3 ХІД РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ .....	35
ЛІТЕРАТУРА .....	42

# 1. ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»

**Задача № 1.** Підйомний пристрій має кінематичну схему (рис. 1.1) і наступні дані: *табл. 1.1.*

Визначити момент інерції для випадку розгону і уповільнення при підйомі вантажу  $m$ .

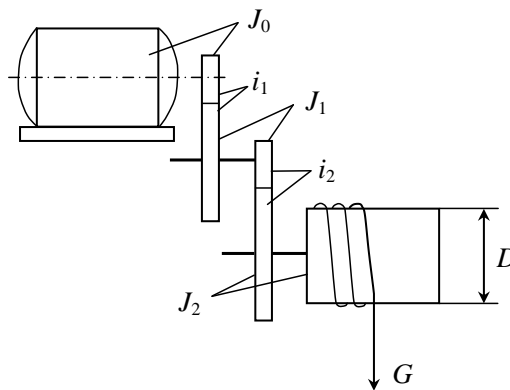


Рисунок 1.1 – Схема підйомного пристрою

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики підйомного пристрою

Варіант	$n$ , об/хв	$J_0$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_1$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_2$ , кг·м <sup>2</sup>	$i_1$	$i_2$	$\eta$	$D$ , м	$m$ , кг
1	980	0,5	2	25	4	4	0,95	0,7	1000
2	980	0,8	3	22	4	2	0,95	0,6	1100
3	1000	0,5	5	20	3	2	0,95	0,7	900
4	950	0,6	3	27	4	3	0,95	0,8	1200
5	1500	0,7	4	30	3	2	0,95	0,9	1030
6	950	0,5	5	22	2	4	0,95	0,7	1050
7	980	0,8	6	23	3	3	0,95	0,6	980
8	1000	0,5	7	24	4	2	0,95	0,7	900
9	1100	0,6	8	25	5	2	0,95	0,8	1110
10	1200	0,7	9	26	4	3	0,95	0,9	1000
11	980	0,5	2	25	4	4	0,95	0,7	1000
12	980	0,8	3	22	4	2	0,95	0,6	1100
13	1000	0,5	5	20	3	2	0,95	0,7	900
14	950	0,6	3	27	4	3	0,95	0,8	1200
15	1500	0,7	4	30	3	2	0,95	0,9	1030
16	950	0,5	5	22	2	4	0,95	0,7	1050

Продовження таблиці 1.1.

17	980	0,8	6	23	3	3	0,95	0,6	980
18	1000	0,5	7	24	4	2	0,95	0,7	900
19	1100	0,6	8	25	5	2	0,95	0,8	1110
20	1200	0,7	9	26	4	3	0,95	0,9	1000
21	980	0,5	2	25	4	4	0,95	0,7	1000
22	980	0,8	3	22	4	2	0,95	0,6	1100
23	1000	0,5	5	20	3	2	0,95	0,7	900
24	950	0,6	3	27	4	3	0,95	0,8	1200
25	1500	0,7	4	30	3	2	0,95	0,9	1030
26	950	0,5	5	22	2	4	0,95	0,7	1050
27	980	0,8	6	23	3	3	0,95	0,6	980
28	1000	0,5	7	24	4	2	0,95	0,7	900
29	1100	0,6	8	25	5	2	0,95	0,8	1110
30	1200	0,7	9	26	4	3	0,95	0,9	1000

**Задача № 2.** Дано двигун типу П91, з паспортними даними, приведенними в табл.1.2,  $R_{\gamma} = 0,049 \cdot R_{ном}$ .

1. Двигун працює в режимі динамічного гальмування з швидкістю, рівній половині номінальної, і номінальним струмом якоря.

Таблиця 1.2 – Паспортні дані двигуна типу П91

Варіант	$P_{ном}$ , кВт	$U_{ном}$ , В	$I_{ном}$ , А	$n_{ном}$ , об/хв
1.	32	220	172	1000
2.	32,5	220	182	1100
3.	33	220	181	1200
4.	33,5	220	183	1300
5.	34	220	180	1400
6.	34,5	220	184	1500
7.	35	220	185	1600
8.	35,5	220	195	1700
9.	36	220	193	1800
10.	36,5	220	196	1900
11.	32	220	172	1000
12.	32,5	220	182	1100
13.	33	220	181	1200
14.	33,5	220	183	1300
15.	34	220	180	1400



Продовження таблиці 1.2

16.	34,5	220	184	1500
17.	35	220	185	1600
18.	35,5	220	195	1700
19.	36	220	193	1800
20.	36,5	220	196	1900
21.	32	220	172	1000
22.	32,5	220	182	1100
23.	33	220	181	1200
24.	33,5	220	183	1300
25.	34	220	180	1400
26.	34,5	220	184	1500
27.	35	220	185	1600
28.	35,5	220	195	1700
29.	36	220	193	1800
30.	36,5	220	196	1900

Знайти величину додаткового опору, включеного в якірне коло, і момент на валу двигуна.

2. Двигун працює в режимі противовмикання із швидкістю  $n = 600$  об/хв. при струмі якоря  $I = 110$  А.

Визначити: величину додаткового опору, включеного в коло якоря; момент на валу двигуна; потужності: споживану з мережі, що підводиться з валу, що поглинається в опорах якірного кола.

3. Двигун працює в генераторному режимі з віддачею енергії в мережу.

Визначити швидкість обертання якоря, якщо струм якоря  $I = 140$  А и  $R_p = 0$ .

**Задача № 3.** Побудувати природну механічну характеристику для асинхронного двигуна з контактними кільцями типу МТ-63-10 в руховому і генераторному режимах роботи.

Таблиця 1.3 – Паспортні дані двигуна типу МТ-63-10

Варіант	$P_{ном}$ кВт	$n_{ном}$ , об/хв	$n_1$ , об/хв	$U_{лв}$ В	З'єднання обмоток	$E_{2к}$ , В,	$I_{2но}$ мА	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$X_1$ , Ом	$X_2$ , Ом
1	60	577	600	380	Y/Y	253	160	0,0549	0,0332	0,16	0,0704
2	60	577	600	380	Y/Y	252	160	0,0548	0,033	0,15	0,0706
3	60	577	600	380	Y/Y	251	160	0,0547	0,0329	0,14	0,0708
4	60	577	600	380	Y/Y	250	160	0,0546	0,0327	0,17	0,071
5	60	577	600	380	Y/Y	249	160	0,0545	0,0325	0,18	0,0712
6	60	577	600	380	Y/Y	248	160	0,0544	0,0323	0,13	0,0714
7	60	577	600	380	Y/Y	247	160	0,0543	0,0321	0,12	0,0716
8	60	577	600	380	Y/Y	246	160	0,0542	0,032	0,19	0,0702
9	60	577	600	380	Y/Y	245	160	0,0541	0,0332	0,11	0,072
10	60	577	600	380	Y/Y	244	160	0,054	0,033	0,16	0,0754
11	60	577	600	380	Y/Y	253	160	0,0549	0,0332	0,16	0,0704
12	60	577	600	380	Y/Y	252	160	0,0548	0,033	0,15	0,0706
13	60	577	600	380	Y/Y	251	160	0,0547	0,0329	0,14	0,0708
14	60	577	600	380	Y/Y	250	160	0,0546	0,0327	0,17	0,071
15	60	577	600	380	Y/Y	249	160	0,0545	0,0325	0,18	0,0712
16	60	577	600	380	Y/Y	248	160	0,0544	0,0323	0,13	0,0714
17	60	577	600	380	Y/Y	247	160	0,0543	0,0321	0,12	0,0716
18	60	577	600	380	Y/Y	246	160	0,0542	0,032	0,19	0,0702
19	60	577	600	380	Y/Y	245	160	0,0541	0,0332	0,11	0,072
20	60	577	600	380	Y/Y	244	160	0,054	0,033	0,16	0,0754
21	60	577	600	380	Y/Y	253	160	0,0549	0,0332	0,16	0,0704
22	60	577	600	380	Y/Y	252	160	0,0548	0,033	0,15	0,0706
23	60	577	600	380	Y/Y	251	160	0,0547	0,0329	0,14	0,0708
24	60	577	600	380	Y/Y	250	160	0,0546	0,0327	0,17	0,071
25	60	577	600	380	Y/Y	249	160	0,0545	0,0325	0,18	0,0712
26	60	577	600	380	Y/Y	248	160	0,0544	0,0323	0,13	0,0714
27	60	577	600	380	Y/Y	247	160	0,0543	0,0321	0,12	0,0716
28	60	577	600	380	Y/Y	246	160	0,0542	0,032	0,19	0,0702
29	60	577	600	380	Y/Y	245	160	0,0541	0,0332	0,11	0,072
30	60	577	600	380	Y/Y	244	160	0,054	0,033	0,16	0,0754

## 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ

### 2.1 Приведення моментів і сил опору, інерційних мас і моментів інерції

Звичайно двигун приводить в дію виробничий механізм через систему передач, окремі елементи якої рухаються з різними швидкостями. Зразкова кінематична схема електроприводу з обертальним рухом виконавчого механізму представлена на рис. 2.1.

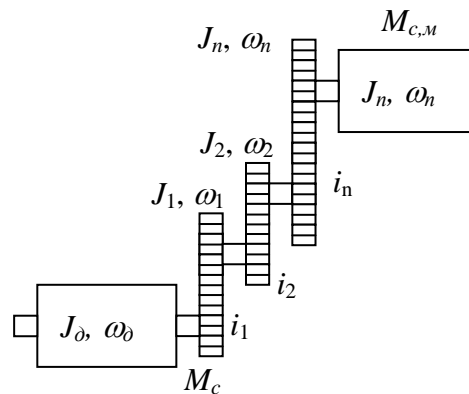


Рисунок 2.1 – Кінематична схема зв'язку двигуна з виконавчим механізмом

Часто в робочих механізмах один з елементів виконує обертальний рух, інші – поступальне, наприклад в таких машинах, як підйомник (рис. 2.2), кран, верстат і т.п. Механічна частина електроприводу може бути складним кінематичним ланцюгом з великим числом елементів, що рухаються. Кожний з елементів реального кінематичного ланцюга володіє пружністю, тобто деформується під навантаженням, а в з'єднаннях елементів є повітряні зазори. Якщо враховувати ці чинники, то розрахункова схема механічної частини приводу буде представлена багатомасовою механічною системою з пружними зв'язками і зазорами, розрахунок динаміки якої складає великі труднощі і можливий тільки за допомогою ЕОМ. Проте основні закономірності руху таких систем визначаються найбільшими масами і зазорами і якнайменшими жорсткостями зв'язків системи, що дозволяє звести розрахункову схему механічної частини приводу або до трьохмасової, або до двохмасової механічної системи з еквівалентними пружними зв'язками і з сумарним зазором (або без нього), приведеним до кутової

швидкості валу двигуна. Але ці розрахункові схеми не використовуються в тих відповідальних випадках, де нехтування пружністю і зазором приведе до великих помилок розрахунку (точні системи стеження радіотелескопів і металоріжучих верстатів; механізми з гнучкими зв'язками, довгими валами, канатами; різкі зміни стану системи і т. п.). Методика розрахунку електроприводів, механічна частина яких містить пружні зв'язки і зазори, розглянута в [1].

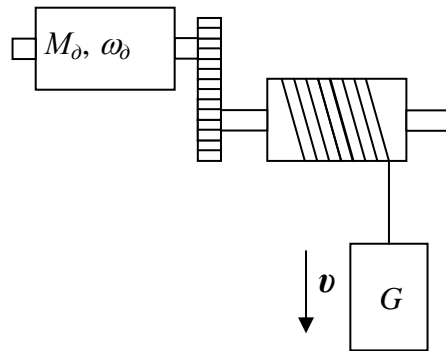


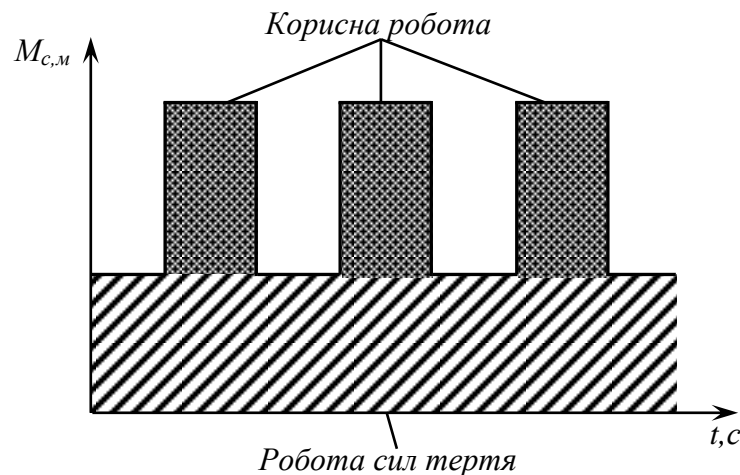
Рисунок 2.2 – Кінематична схема приводу підйомника

В більшості практичних випадків в інженерних розрахунках при рішенні задач, що не вимагають великої точності, і для механічних ланок, що володіють невеликими зазорами і незначною пружністю (великою жорсткістю), можна нехтувати зазорами і пружністю, прийнявши механічні зв'язки абсолютно жорсткими. При цьому допущенні рух одного елемента дає повну інформацію про рух всієї решти елементів, тому рух електроприводу можна розглядати на якому-небудь одному механічному елементі. Звичайно як такий елемент приймають вал двигуна.

## 2.2 Моменти опору, їх види

Розрахункову схему механічної частини приводу, отже, можна звести до однієї узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції  $J$ , на яку впливає електромагнітний момент двигуна  $M$  і сумарний приведений до валу двигуна момент опору (статичний момент)  $M_c$ , що включає всі механічні втрати в системі, у тому числі механічні втрати в двигуні. Момент опору механізму  $M_{c,m}$  (рис. 2.1), що виникає на валу робочої машини, складається з двох складових, відповідних корисній роботі і роботі тертя.

Корисна робота, яка виконується виробничим механізмом, пов'язана з виконанням відповідної технологічної операції. Графік корисної роботи може бути побудований на підставі аналітичних розрахунків або за експериментальними даними. Такий графік, наприклад, для верстата, що працює по циклічному закону, представлений на рис. 2.3. Заштрихована область графіка відповідає корисній роботі; не заштрихована частина графіка відповідає роботі тертя. При здійсненні корисної роботи відбувається деформація матеріалу або змінюється запас потенційної енергії тіл, наприклад в підйомних пристроях. В деяких машинах здійснення корисної роботи пов'язано з незначним перевищенням моменту в порівнянні з моментом тертя (наприклад, друкарська машина, розмельний кульовий млин, кран, що пересувається по горизонтальним направляючим, і т. п.).



**Рисунок 2.3 – Циклічний графік роботи електроприводу виробничого механізму**

Робота тертя, яка виконується у виробничому механізмі, враховує звичайно ККД механічних зв'язків приводу. Роботу тертя можна іноді врахувати, користуючись даними, отриманими на підставі досвіду. Наприклад, при підйомі вантажу  $G_1$  на висоту  $h$  можна вважати, що сили тертя як би збільшують вагу вантажу на деяке додаткове значення  $G_0$ . Тоді робота підйому, Дж, записується таким чином:

$$A = h(G_1 + G_0). \quad (2.1)$$

В насосах втрати можуть враховуватися деякою фіктивною до-

датковою висотою подачі  $h_0$ . Момент тертя завжди направлений проти рушійного моменту приводу.

*Моменти опору можна розділити на дві категорії, а саме:*

- 1) реактивні моменти;
- 2) активні або потенційні моменти.

В першу категорію включаються моменти опору від стиснення, різання, моменти тертя і т. п., перешкоджаючі руху приводу і які змінюють свій знак при зміні напрямку обертання. В другу категорію входять моменти від сили тяжіння, а також від розтягування, стиснення і скручування пружних тіл. Ці моменти можуть бути названі потенційними, оскільки вони пов'язані із зміною потенційної енергії окремих елементів приводу. Потенційні моменти можуть гальмувати рух приводу або, навпаки, сприяти його руху. Слід зазначити, що на відміну від реактивного статичного моменту активний момент зберігає свій знак при зміні напрямку обертання приводу. Наприклад, момент, створюваний вантажем підйомного механізму, зберігає свій знак, як при підйомі його, так і при опусканні. Отже, в даному випадку активний статичний момент при підйомі перешкоджає руху, а при опусканні сприяє йому.

Приведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої може бути проведено на підставі енергетичного балансу системи. При цьому втрати потужності в проміжних передачах враховуються введенням в розрахунки відповідного ККД –  $\eta_n$ . Позначимо через  $\omega_\delta$  кутову швидкість валу двигуна, а  $\omega_m$  – кутову швидкість валу виробничого механізму. На підставі рівності потужностей отримаємо:

$$M_{c,m} \omega_m \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_\delta, \quad (2.2)$$

звідки

$$M_c = M_{c,m} \frac{\omega_m}{\omega_\delta} \frac{1}{\eta_n} = \frac{M_{c,m}}{i\eta_n}, \quad (2.3)$$

де  $M_{c,m}$  – момент опору виробничого механізму, Н·м;

$M_c$  – той же момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, Н·м;

$i = \frac{\omega_\partial}{\omega_m}$  – передавальне число.

За наявності декількох передач між двигуном і механізмом (рис. 2.1) з передавальними числами  $i_1, i_2, \dots, i_n$  і відповідними ККД  $\eta_{n1}, \eta_{n2}, \dots, \eta_{nm}$  момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, визначається формулою:

$$M_o = M_{c,m} \frac{1}{i_1 i_2 \dots i_n} \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \dots \eta_{nm}}. \quad (2.4)$$

Приведення сил опору проводиться аналогічно приведенню моментів. Якщо швидкість поступального руху  $\upsilon$ , м/с, а кутова швидкість валу двигуна  $\omega_\partial$ , рад/с, тоді:

$$F_{c,m} \upsilon \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_\partial, \quad (2.5)$$

де  $F_{c,m}$  – сила опору виробничого механізму, Н.

Звідси приведений до швидкості валу двигуна момент опору визначається:

$$M_c = \frac{F_{c,m} \upsilon}{\omega_\partial \eta_n}. \quad (2.6)$$

У разі приведення обертального руху до поступального приведенне зусилля визначається:

$$F_{c,m} = \frac{M_c \omega_\partial \eta_n}{\upsilon}, \quad (2.7)$$

Приведення моментів інерції до однієї осі обертання засновано на тому, що сумарний запас кінетичної енергії частин приводу, що рухаються, віднесений до однієї осі, залишається незмінним. За наявності обертаються частин, що володіють моментами інерції  $J_\partial, J_1, J_2, \dots, J_n$  і кутовими швидкостями  $\omega_\partial, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  (рис. 2.1), можна замінити їх динамічну дію дією одного моменту інерції, приведенного напри-

клад, до швидкості валу двигуна. У такому разі можна написати:

$$J \frac{\omega_{\delta}^2}{2} = J_{\delta} \frac{\omega_{\delta}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}. \quad (2.8)$$

Звідки результуючий або сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна:

$$J = J_{\delta} + J_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\delta}} \right)^2 + J_2 \left( \frac{\omega_2}{\omega_{\delta}} \right)^2 + \dots + J_n \left( \frac{\omega_n}{\omega_{\delta}} \right)^2, \quad (2.9)$$

де  $J_{\delta}$  – момент інерції ротора двигуна і інших елементів (муфти, шестерні і т. п.), встановлених на валу двигуна. Іноді в каталогах для двигунів указується значення махового моменту  $GD^2$ , Н·м<sup>2</sup>. В цьому випадку моменти інерції ротора двигуна, кг·м<sup>2</sup>, в системі СІ обчислюються по формулі:

$$J_p = \frac{GD^2}{4g}, \quad (2.10)$$

$$GD^2 = J_{\delta} \cdot 4g,$$

де  $D$  – діаметр інерції, м;  $G$  – сила тяжіння (вага), Н. Це співвідношення витікає з формули, що визначає момент інерції тіла масою  $m$ , кг:

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}, \quad (2.11)$$

де  $\rho$  – радіус інерції, м.

Якщо сила тяжкості виражена в ньютонках, тоді маса тіла визначається:

$$G = mg, \quad (2.12)$$

де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.



Момент інерції суцільного циліндра відносно подовжньої осі обчислюється за формулою:

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (2.13)$$

де  $R$  – радіус циліндра, м.

Для полого циліндра:

$$GD^2 = 2\pi m_* l (r_2^4 - r_1^4);$$

$$J = \frac{GD^2}{4g} = \frac{2\pi l m_*}{4g} (r_2^4 - r_1^4) = \frac{\pi l m_*}{2g} (r_2^4 - r_1^4); \quad (2.14)$$

$$m = \frac{\pi l m_* (r_2^2 - r_1^2)}{g}.$$

де  $m_*$  – питома вага, кг/м<sup>3</sup>.

Якщо шестерня обертається навкруги осі, співпадаючої з початком кола, то маховий момент:

$$GD_{u1}^2 = GD_{uu}^2 + 4a^2 G, \quad (2.15)$$

де  $a$  – радіус кола, м.

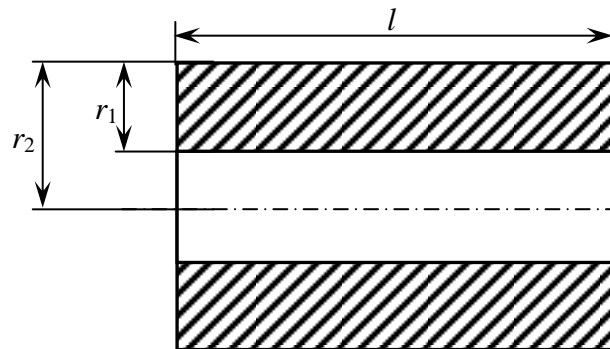


Рисунок. 2.4 – Полий циліндр

Приведення мас, що рухаються поступально, здійснюється та-

кож на підставі рівності запасу кінетичної енергії:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = J \frac{\omega_\delta^2}{2}. \quad (2.16)$$

Звідси момент інерції, приведений до валу двигуна визначається:

$$J = m \left( \frac{\upsilon}{\omega_\delta} \right)^2. \quad (2.17)$$

Якщо механізм має елементи, що обертаються і поступально рухаються, то сумарний приведений до валу двигуна момент інерції визначається на підставі (2.9) і (2.14)

Якщо ККД не дано:

$$J = J_\delta + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + m \left( \frac{\upsilon}{\omega_\delta} \right)^2 \dots; \quad (2.18)$$

При розгоні:

$$J_{\text{розг.}} = J_0 + \frac{J_1}{i_1^2 \eta_1} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \eta_1 \eta_2} + \dots + \frac{J_n}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2 \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n} + \frac{m\upsilon^2}{\omega^2 \eta}; \quad (2.19)$$

При гальмуванні:

$$J_{\text{мор.}} = J_0 + \frac{J_1 \eta_1}{i_1^2} + \frac{J_2 \eta_1 \eta_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_n \eta_n}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + \frac{m\upsilon^2 \eta}{\omega^2}. \quad (2.20)$$

Для приведення моменту інерції до поступального руху потрібно момент інерції замінити приведеною масою, тобто:

$$m = J \left( \frac{\omega_\delta}{\upsilon} \right)^2. \quad (2.21)$$

Рівняння рівноваги моментів для обертаючого руху (рівняння

руху приводу) має наступний вигляд:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.22)$$

У разі виконання операції приведення при підйомі вантажу (розрахувати приведений момент навантаження):

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot \rho}{\eta_p \cdot \eta_B}. \quad (2.23)$$

### **2.3 Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження в гальмівних режимах**

Вже розглянута робота двигуна незалежного збудження в режимі двигуна, чому відповідали механічні характеристики, представлені на рис. 5.1 [1] і розташовані в першому квадранті координатних осей. Проте цим не вичерпуються можливі режими роботи електродвигуна і його механічні характеристики.

Вельми часто в сучасних електроприводах необхідно швидко і точно зупинити механізм або змінити напрям його руху. Швидкість і точність, з якою будуть виконані ці операції, у багатьох випадках визначають продуктивність механізму, а іноді і якість продукту, що виробляється.

Під час гальмування або зміни напрямку руху (реверсу) електродвигун працює в гальмівному режимі на одній з механічних характеристик відповідних здійснюваному способу гальмування. Графічне зображення механічних характеристик двигуна незалежного збудження для різних режимів роботи представлено на рис. 2.5. Тут, окрім ділянки характеристик, відповідних руховому режиму (квадрант I), показані ділянки характеристик в квадрантах II і IV, які характеризують три можливі способи генераторного електричного гальмування, а саме:

- 1) гальмування з віддачею енергії в сіть (рекуперативне);
- 2) динамічне гальмування;
- 3) гальмування противовмиканням.

*Кожний гальмівний режим є генераторним, оскільки енергія поступає в машину з валу, перетворюється в електричну і або віддаєть-*

ся в мережу, або затрачується на нагрів елементів якірного кола, що володіють активним опором, і розсіюється в оточуюче середовище.

Розглянемо докладніше особливості механічних характеристик при вказаних способах гальмування.

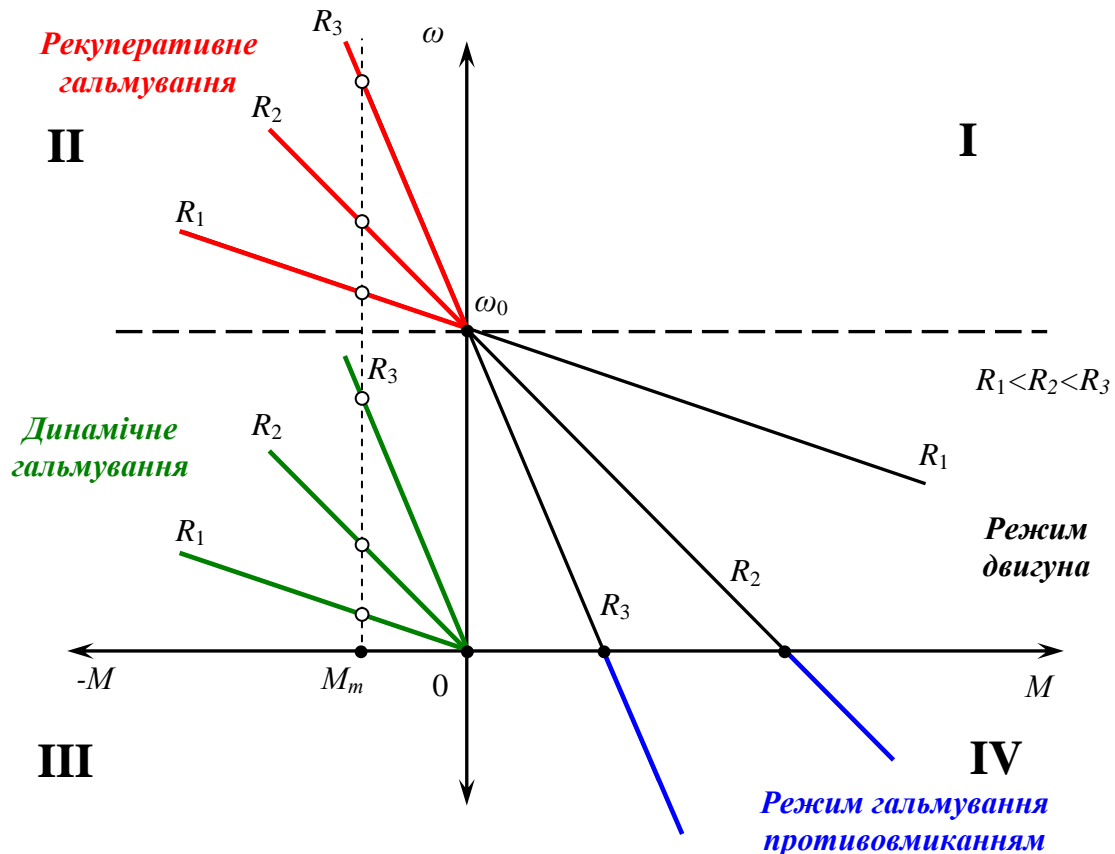


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при різних режимах роботи

## 2.4 Гальмування з віддачею енергії в мережу

1. Гальмування з віддачею енергії в мережу (генераторний режим роботи паралельно з мережею) здійснюється у тому випадку, коли швидкість двигуна виявляється вище за швидкість ідеального холостого ходу і його ЕРС  $E$  більше прикладеної напруги  $U$ . Двигун тут працює в режимі генератора паралельно з мережею, якої він віддає електричну енергію; струм при цьому змінює свій напрям. Останнє очевидно з виразу:

$$I = \frac{U - E}{R} = -\frac{E - U}{R}, \quad (2.24)$$

отже, змінює знак і момент двигуна, тобто він стає гальмівним  $M = -k\Phi I$ . Якщо позначити гальмівний момент через  $M_m = -M$ , тоді рівняння  $\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{k^2\Phi^2}$ , при  $\omega > \omega_0$  прийме наступний вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M_m \frac{R}{k^2\Phi^2}. \quad (2.25)$$

Перший член в правій частині рівняння показує, що механічна характеристика двигуна незалежного збудження в цьому генераторному режимі при  $M = 0$  проходить через крапку, відповідну кутовій швидкості ідеального холостого ходу, як і у разі режиму двигуна. Нахил (жорсткість) механічної характеристики визначається співмножником другого члена рівняння  $\frac{R}{k^2\Phi^2}$ , який по абсолютному значенню (при заданому опорі  $R$ ) залишається незмінним. Отже, нахил механічної характеристики в даному генераторному режимі буде таким же, як і в режимі двигуна. Тому графічно механічні характеристики двигуна в режимі гальмування з віддачею енергії в мережу є продовженням характеристик режиму двигуна в область квадранта II (рис. 2.5). Цей спосіб гальмування, можливий, наприклад, в приводах транспортних і підйомних механізмів при спуску вантажу і при деяких способах регулювання швидкості, коли двигун, переходячи до низьких швидкостей, проходить значення  $\omega > \omega_0$ . Таке гальмування є вельми економічним, оскільки воно супроводиться віддачею в мережу електричної енергії (за вирахуванням втрат в двигуні), яку двигун перетворить з механічної, що поступає до нього з валу. Але гальмування цим способом може бути здійснено в обмежених рамках, оскільки не у всіх приводах можливо дотримання умови  $\omega > \omega_0$ .

Необхідно відзначити, що чим більше опір в якірному колі двигуна, тим вище його кутова швидкість в генераторному режимі роботи паралельно з мережею при тому ж гальмівному моменті (рис. 2.5).

## 2.5 Динамічне гальмування

Динамічне гальмування відбувається при відключенні якоря двигуна від мережі і замиканні його на резистор (рис. 2.6), тому іноді його називають *реостатним гальмуванням*. Обмотка збудження при цьому повинна залишатися приєднаною до сіті. Режим динамічного гальмування також відповідає роботі машини як генератор. Проте цей режим відрізняється від описаного вище гальмування з віддачею

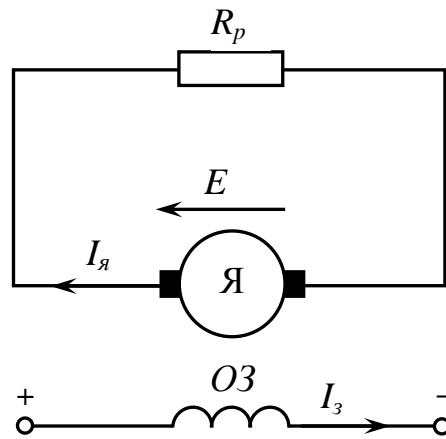


Рисунок 2.6 – Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження при динамічному гальмуванні

енергії в мережу. При динамічному гальмуванні, так само як і у попередньому випадку, механічна енергія, що поступає з валу, наприклад, у вигляді кінетичної енергії, запасеної в двигуні і в елементах що приводиться їм механізму, що рухаються, перетвориться в електричну. Проте ця енергія не віддається в мережу, а виділяється у вигляді теплоти в опорах кола якоря.

Унаслідок того, що ЕРС двигуна зберігає при гальмуванні такий же знак, як і в руховому режимі, а напруга ззовні до якоря не прикладається, струм якоря визначається по формулі:

$$I = \frac{-E}{R}, \quad (2.26)$$

де  $R$  – опір якорного кола.

Гальмівний момент при динамічному гальмуванні, якщо нехтувати реакцією якоря, може бути виражений рівністю:

$$-M_m = k\Phi I = -k^2 \frac{\Phi^2}{R} \omega. \quad (2.27)$$

При  $\Phi = const$  отримаємо:

$$\omega = M_\delta \frac{R}{c^2}. \quad (2.28)$$

При динамічному гальмуванні механічна характеристика двигуна, як це видно з (2.28), є прямою, що проходить через початок координат. Сімейство характеристик динамічного гальмування при різних опорах  $R$  якірного кола показано в квадранті II на рис. 2,5. Як видно з цього рисунка, жорсткість характеристик зменшується із збільшенням опору якірного кола.

Динамічне гальмування широко використовується для зупинки приводу при відключенні його від мережі (особливо при реактивному характері моменту), при спуску вантажів в підйомних механізмах. Воно достатнє економічно, хоча і поступається в цьому відношенні гальмуванню з віддачею енергії в мережу.

## 2.6 Гальмування противовмиканням

*Гальмування противовмиканням (генераторний режим роботи послідовно з мережею)* здійснюється у тому випадку, коли обмотки двигуна включені для одного напрямку обертання, а якір двигуна під впливом зовнішнього моменту або сил інерції обертається в протилежну сторону. Це може відбуватися, наприклад, в приводі підйомника, коли двигун включений на підйом, а момент, що розвивається вантажем, примушує привід обертатися у бік спуску вантажу. Такий же режим виходить і при перемиканні обмотки якоря (або обмотки збудження) двигуна для швидкої зупинки або для зміни напрямку обертання на протилежну.

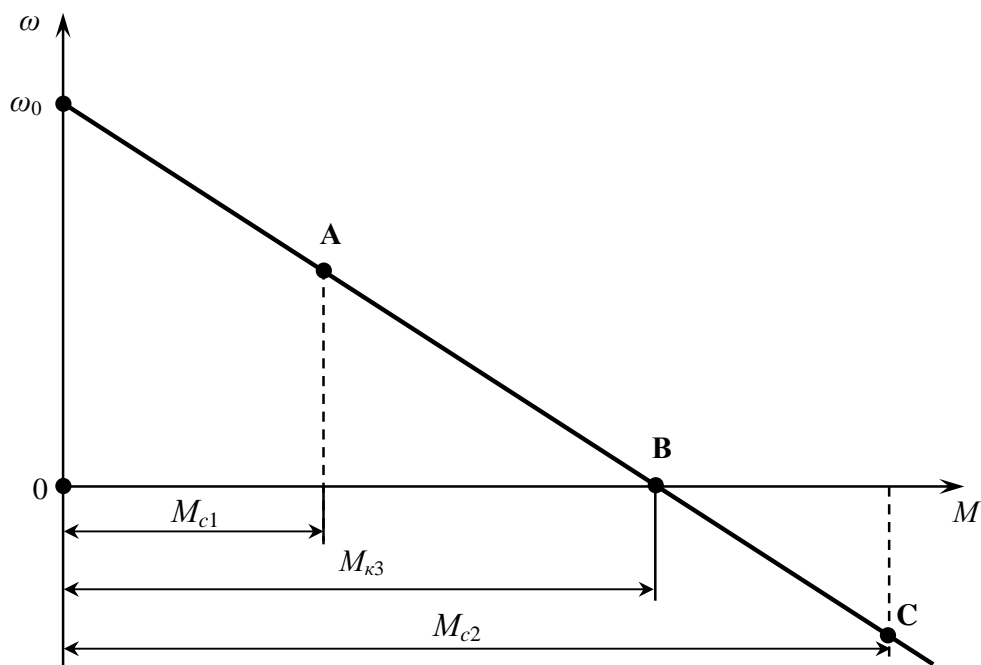
Графічне зображення механічної характеристики для гальмування противовмиканням, коли має місце, наприклад, так званий гальмівний спуск вантажу, приведено на рис. 2.7. Як видно з цього рисунку,

а також з рис. 2.5, механічна характеристика при гальмуванні протипротивовмиканням є продовженням характеристики режиму двигуна в область квадранта IV. Останнє, витікає з рівняння механічної характеристики двигуна, якщо вважати момент більшим за момент короткого замикання і позитивним по знаку.

При включенні обмоток двигуна для підйому двигун може бути пущений в хід лише тоді, коли момент опору вантажу  $M_{c1}$  буде менше моменту  $M_{кз}$  (рис. 2.7). В цьому випадку після включення двигуна в мережу кутова швидкість його збільшується і досягає сталого значення (крапка А).

При цьому струм в якорі, як завжди в руховому режимі, визначається по формулі:

$$I = \frac{U - E}{R}. \quad (2.29)$$



**Рисунок 2.7 – Механічна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження при гальмуванні протипротивовмиканням у разі гальмівного спуску**

Із збільшенням моменту вантажу кутова швидкість двигуна зменшується відповідно характеристиці АВ, і якщо момент вантажу буде рівний  $M_{кз}$ , двигун зупиниться. В цьому стані, при  $\omega = 0$ , ЕРС двигуна рі-



вна нулю, тому струм визначається виразом:

$$I = I_{кз} = \frac{U}{R}.$$

Коли момент опору при подальшому збільшенні вантажу перевищить момент двигуна в нерухомому стані, останній почне обертатися в протилежному напрямі і вантаж стане опускатися. При моменті, рівному  $M_{c2}$ , буде досягнута стала швидкість спуску відповідна крапці С на приведеній характеристиці. Оскільки якір тепер обертається у зворотний бік, а напрям магнітного потоку не змінився, ЕРС двигуна змінить напрям на зворотний. Струм, визначуваний рівнянням:

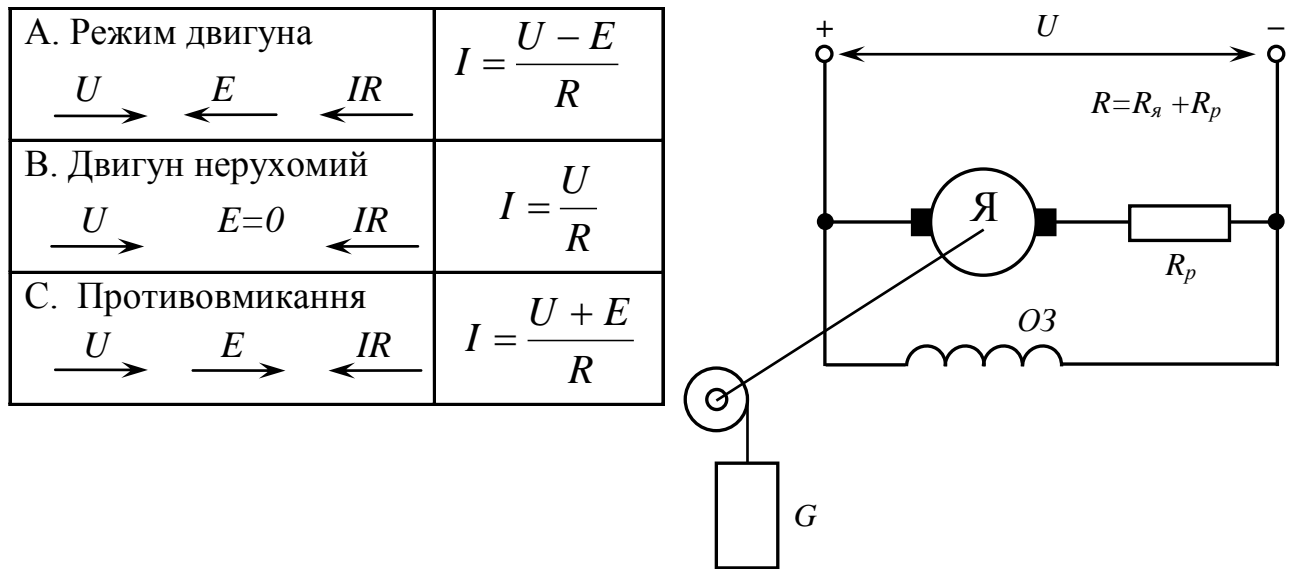
$$I = \frac{U + E}{R}, \quad (2.30)$$

буде більше, ніж в руховому режимі, і відповідно момент, що розвивається двигуном при гальмуванні противовмиканням, теж зросте.

В таблиці на рис. 2.8 стрілками показані напрями напруги, ЕРС і падіння напруги, а також дані співвідношення для струмів якоря у разі режиму двигуна, короткого замикання і гальмування противовмиканням при одному і тому ж значенні опору якірного кола. Для обмеження струму і моменту при гальмуванні доводиться включати додатковий резистор.

Розглянуте гальмування противовмиканням при сталій швидкості використовується, наприклад, в підйомних пристроях при спуску вантажу  $G$  (рис. 2.8). Як видно з таблиці на рис. 2.8, при гальмуванні противовмиканням ЕРС двигуна направлена послідовно-згідний з напругою мережі, тобто двигун працює в генераторному режимі послідовно з мережею, одержуючи механічну енергію з валу і перетворюючи її в електричну енергію.

Споживається електрична енергія і з мережі. Енергія, яка виробляється двигуном і споживається з мережі виділяється у вигляді теплоти в опорах кола якоря, тому гальмування противовмиканням не економічно, вимагає великих витрат енергії.



**Рисунок 2.8 – Ілюстрація можливих режимів роботи двигуна при підйомі і спуску вантажу**

Значно частіше, ніж за рахунок вантажу, гальмування противовмиканням одержують, змінюючи полярність напруги, що підводиться до якоря двигуна при його обертанні. В цьому випадку, так само як і в попередньому (при спуску вантажу), ЕРС направлена згідно з напругою мережі, а момент двигуна направлений проти обертання якоря. Як було сказано вище, в режимі противовмикання необхідно включати додатковий резистор в якірне коло для обмеження струму і моменту. При цьому механічні характеристики матимуть великий нахил до осі абсцис.

На рис. 2.9 представлені механічні характеристики при гальмуванні противовмиканням. Тут при зміні полярності напруги, що підводиться до якоря, двигун, що працював до цього з швидкістю, відповідній крапці А квадранта **I**, переходить на роботу по характеристики **BC** (індуктивністю якірного кола нехтуємо) в крапку В квадранта **II**. Збереження незмінної швидкості в перший момент перемикання двигуна обумовлюється механічною інерцією електроприводу. Під впливом гальмівного моменту швидкість двигуна зменшується відповідно характеристиці BC до нульового значення. При швидкості, рівній нулю (крапка С, рис. 2.9), двигун у разі гальмування для зупинки, а не реверсу, повинен бути відключений від мережі.

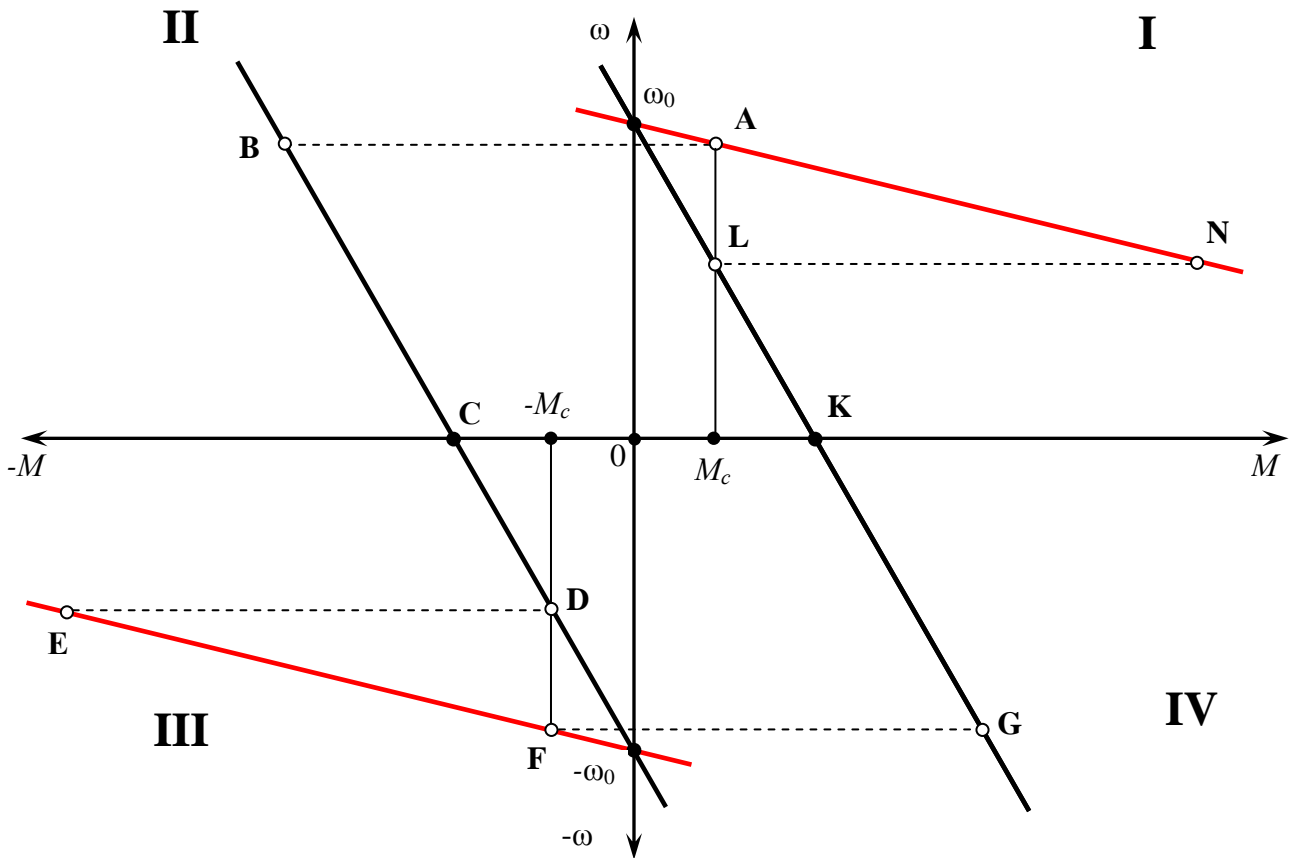


Рисунок 2.9 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при гальмуванні противовмиканням

Якщо такого відключення не відбудеться, швидкість двигуна почне збільшуватися у зворотному напрямі (характеристика **CD** квадранта **III**). Разом із зміною напрямку обертання змінює напрям ЕРС якоря яка знову в руховому режимі направлена зустрічно напрузі мережі. Тепер привід знов працює в режимі двигуна з постійною кутовою швидкістю, будучи перекладеним на природну характеристику протилежного напрямку обертання (точка **F** характеристики **FE**).

Якщо ще раз змінити полярність напруги на висновках якоря, то двигун знов перейде в режим противовмикання. Гальмування і подальше збільшення кутової швидкості двигуна у зворотному напрямі відбуваються по характеристиці **GKL**.

Зміна напрямку обертання двигуна може бути здійснений двоюко. Щоб отримати режим противовмикання, можна перемкнути або обмотку якоря, або обмотку збудження. Проте перемикання обмотки

збудження практикується рідше, оскільки унаслідок значної її індуктивності час гальмування зростає в порівнянні з часом гальмування при перемиканні обмотки якоря.

Електричне гальмування отримало в даний час широке застосування, особливо в приводах, що часто пускаються. Для забезпечення необхідного часу гальмування і необхідної точності зупинки в практиці частіше за все застосовується динамічне гальмування або гальмування противовмиканням. Для нереверсивних приводів частіше застосовують динамічне гальмування, оскільки воно здійснюється по більш простій схемі. Для реверсивних приводів, де гальмування і пуск двигуна у зворотному напрямі є єдиним процесом, доцільно застосовувати гальмування противовмиканням, яке дає вигоду в часі.

## **2.7 Рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна**

Асинхронні двигуни (АД) отримали в промисловості широке застосування завдяки ряду істотних переваг в порівнянні з іншими типами двигунів. Асинхронний двигун простий і надійний в експлуатації, оскільки не має колектора; асинхронні двигуни дешевше і значно легше за двигуни постійного струму.

Трифазний АД має обмотку статора, що підключається до трифазної мережі змінного струму з напругою  $U_1$  і частотою  $f_1$  і обмотку ротора, що може бути виконана за двома варіантами (рис. 2.10).

Перший варіант передбачає виконання звичайної трифазної обмотки з провідників з виводами на три контактних кільця. Така конструкція відповідає АД з фазним ротором (рис. 2.10. а) і дозволяє включати в роторне коло різні електротехнічні елементи, наприклад резистори, для регулювання швидкості, струму і моменту ЕП і створювати з тією ж метою спеціальні схеми включення АД. Інший вид обмотки одержують заливанням алюмінію в пази ротора, у результаті чого утвориться конструкція, відома під назвою «біляча клітка». Схема АД з такою обмоткою, яка не має виводів і отримала назву короткозамкнута, представлена на рис. 2.10. б.

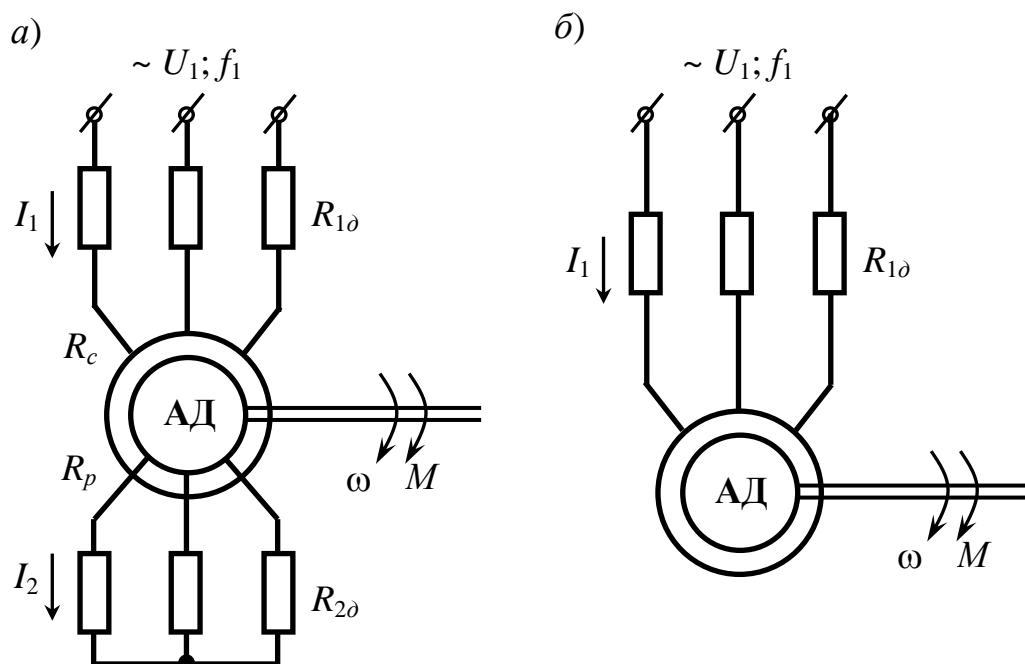


Рисунок 2.10 – Схема включення АД с фазним ротором (а) і з коротко замкнутим ротором (б)

Для отримання виразів для електромеханічної і механічної характеристик АД використовується його схема заміщення, на якій коло статора і ротора представлені своїми активними й індуктивними опорами. Особливість схеми заміщення АД полягає в тому, що струм, ЕРС і параметри кола ротора перераховані (приведені) до кола статора, що і дозволяє зобразити ці два кола на схемі з'єднаними електрично, хоча в дійсності зв'язок між ними здійснюється через електромагнітне поле.

Приведення здійснюється за допомогою коефіцієнта трансформації АД за ЕРС:

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{0,95U_{\phi.\text{ном}}}{E_{2k}}, \quad (2.31)$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – фазні ЕРС статора і ротора при нерухомому роторі;  
 $U_{\phi.\text{ном}}$  – фазна номінальна напруга мережі.

Розрахункові формули приведення мають такий вигляд:

$$E'_2 = E_2 k = E_1; I'_2 = \frac{I_2}{k}; R'_2 = R_2 k^2 X'_2 = X_2 k^2, \quad (2.32)$$

де штрихом позначені приведені значення.

У теорії електричних машин розроблені і застосовуються дві основні схеми заміщення АД: більш точна Т-подібна і спрощена П-подібна. На рис. 2.11 представлено П-подібну схему заміщення, що надалі і використовується при виведенні формул для характеристик АД.

На схемах (рис. 2.10 та рис. 2.11) прийняті такі позначення:

$U_1, U_\phi$  – діючі значення лінійної і фазної напруги мережі;

$I_1, I_\mu, I'_2$  – фазні струми статора, намагнічування і приведений струм ротора;

$X_1, X'_2$  – індуктивні опори від потоків розсіювання фази обмотки статора і приведеної фази ротора;

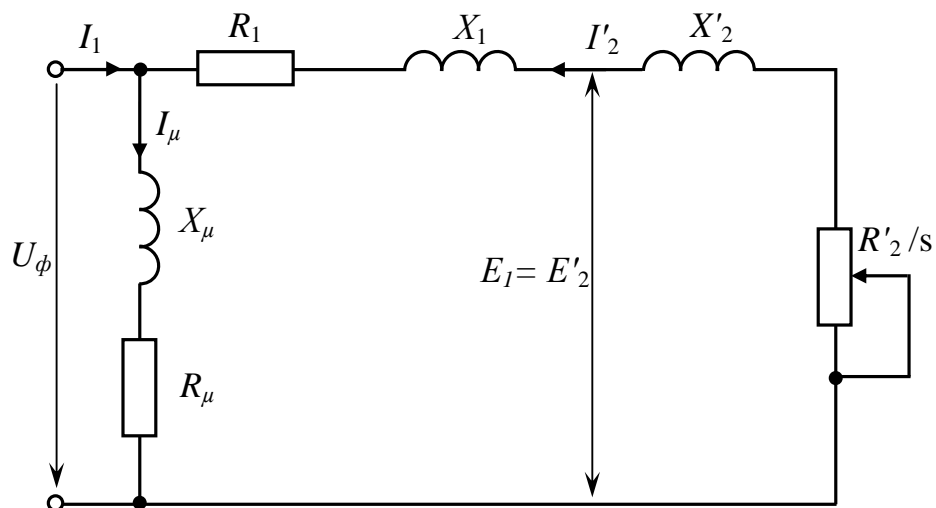
$X_\mu$  – індуктивний опір контуру намагнічування;

$R_\mu$  – активний опір контуру намагнічування;

$R_c, R_{1\delta}, R_1 = R_c + R_{1\delta}$  – активні фазні опори обмотки статора, додаткового резистора і сумарний опір статора;

$R'_p, R'_{2\delta}, R'_2 = R'_p + R'_{2\delta}$  – активні приведені до обмотки статора фазні опори обмотки ротора, додаткового резистора і сумарний опір ротора;

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \text{ – ковзання АД;}$$



## Рисунок 2.11 – Схема заміщення АД

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} - \text{кутова швидкість магнітного поля АД (швидкість}$$

ідеального холостого ходу);

$f_1$  – частота живильної напруги;

$p$  – число пар полюсів АД.

Як видно зі схеми, ЕРС статора дорівнює приведеній ЕРС ротора, а струм намагнічування  $I_\mu$ , який визначає магнітний потік АД, протікає під дією  $U_\phi$  за визначеним колом, що складається з опорів контуру намагнічування  $X_\mu$  і  $R_\mu$ , і являє собою векторну суму струмів статора і приведеного роторного, тобто  $I_\mu = I_1 + I'_2$ .

Відповідно до приведенної схеми заміщення можна отримати вирази для вторинного струму:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (2.33)$$

Момент асинхронного двигуна може бути визначений з виразу втрат, звідки:

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}. \quad (2.34)$$

Підставляючи значення струму  $I'_2$  в (9.4), одержуємо:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 \left[ \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] s}, \quad (2.35)$$

Крива моменту  $M = f(s)$  має два максимуми: один – в генераторному режимі, інший – в режимі двигуна (при значних опорах роторного кола максимум моменту може опинитися в режимі гальмування

протитоввмиканням).

Прирівнюючи, визначаємо значення критичного ковзання  $s_{кр}$ , при якому двигун розвиває максимальний (критичний) момент:

$$s_{\epsilon\delta} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (2.36)$$

Підставляючи значення  $s_{кр}$  в (9.5), знаходимо вираз для максимального моменту:

$$M_{\epsilon\delta} = \frac{3U_{\delta}^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}. \quad (2.37)$$

Знак “+” в рівності (2.36) і (2.37) відноситься до режиму двигуна (або гальмування протитоввмиканням), знак “-” до генераторного режиму роботи паралельно з мережею (при  $\omega > \omega_0$ ).

Якщо вираз (2.35) розділити на (2.37) і провести відповідні перетворення, то можна отримати:

$$M = \frac{2M_{кр} (1 + as_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2as_{кр}}, \quad (2.38)$$

де  $M_{кр}$  – максимальний момент двигуна;

$s_{кр}$  – критичне ковзання, відповідне максимальному моменту;

$$a = \frac{R_1}{R'_2}.$$

Тут слід підкреслити дуже важливу для практики обставину – вплив зміни напруги мережі на механічні характеристики АД. Як видно з (2.36), при даному ковзанні момент двигуна пропорційний квадрату напруги, тому двигун цього типу чутливий до коливань напруги мережі.



## 2.8 Механічні характеристики асинхронного двигуна

Критичне ковзання і кутова швидкість ідеального холостого ходу не залежать від напруги.

На рис. 2.12 приведена механічна характеристика АД.

Її характерні точки:

- 1)  $s = 0$ ;  $M = 0$ , при цьому швидкість двигуна дорівнює синхронній;
- 2)  $s = s_{ном}$ ;  $M = M_{ном}$ , що відповідає номінальній швидкості і номінальному моменту;
- 3)  $s = s_{кр}$ ;  $M = M_{кр,д}$  – максимальний момент в режимі двигуна;
- 4)  $s = 1,0$ ;  $M = M_{II} = \frac{2M_{кр} (1 + as_{кр}) s_{кр}}{1 + s_{кр}^2 (1 + 2a)}$  – початковий пусковий момент;
- 5)  $s = -s_{кр}$ ;  $M = M_{кр,г}$  – максимальний момент в генераторному режимі роботи паралельно з мережею.

При  $s > 1,0$  двигун працює в режимі гальмування протиковми-канням, при  $s < 0$  має місце генераторний режим роботи паралельно з мережею (рекуперативного гальмування).

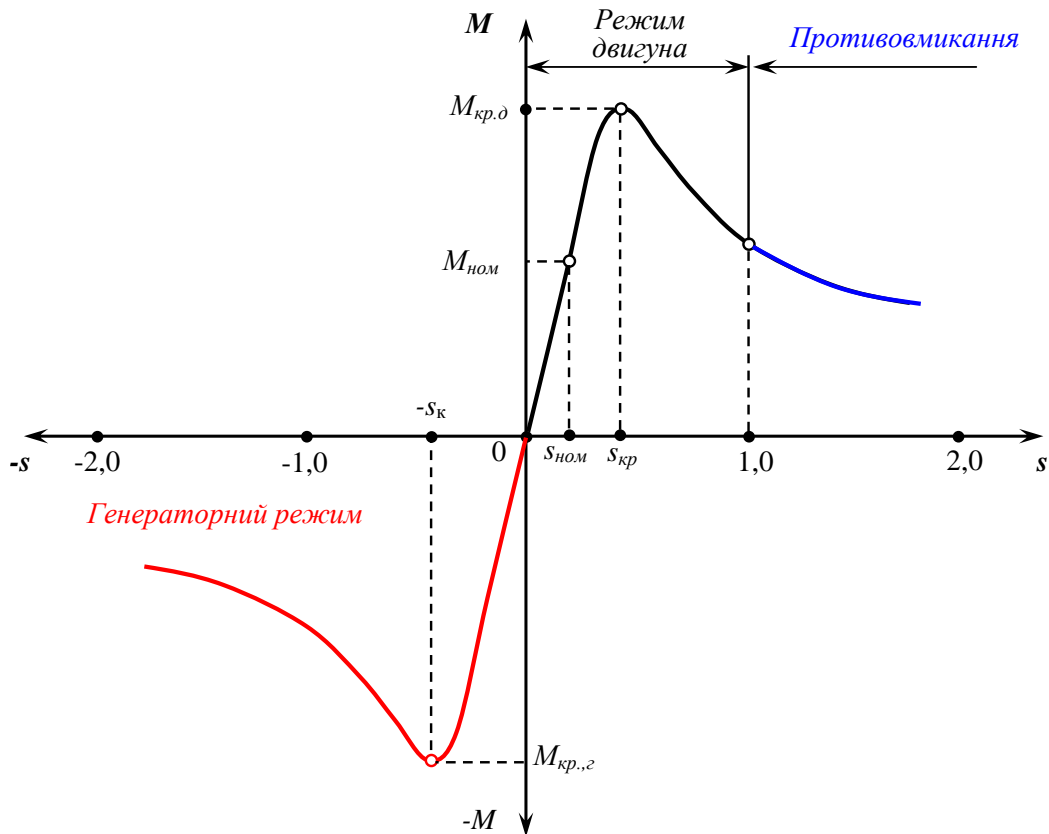


Рисунок 2.12 – Механічна характеристика асинхронного двигуна  
 Необхідно підкреслити, що абсолютні значення в режимі двигуна і генераторному паралельно з мережею однакові.

Проте з (2.37) витікає, що максимальні моменти в режимі двигуна і генераторному режимі різні. У генераторному режимі роботи паралельно з мережею максимальний момент по абсолютному значенню більше, що виходить із співвідношення:

$$M_{кр.г} = M_{кр.д} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}, \quad (2.39)$$

де  $X_{\kappa} = X_1 + X_2'$ .

Якщо в рівнянні (2.38) нехтувати активним опором статора, то вийде формула, зручніша для розрахунків:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (2.40)$$

$$\text{де } s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{X_k}; M_{кр} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 X_k}$$

Підставивши у вираз (2.40) замість поточних значень  $M$  і  $s$  їх номінальні значення і позначивши кратність максимального моменту  $\frac{M_{кр}}{M_{ном}}$  через  $\lambda$  – перевантажувальна здатність, отримаємо:

$$s_{кр} = s_{ном} \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (2.41)$$

Аналіз формули (9.10) показує, що при  $s > s_{кр}$  (неробоча частина характеристики) вийде рівняння гіперболи, якщо в цьому випадку нехтувати другим членом знаменника в рівнянні (9.10), тобто:

$$M = 2M_{кр} \frac{s_{кр}}{s}, \quad (2.42)$$

або

$$M = A / s, \quad (2.43)$$

де  $A = 2M_{кр}s_{кр}$ .

Ця частина характеристики практично відповідає лише пусковим і гальмівним режимам.

При малих значеннях ковзання ( $s < s_{кр}$ ) для  $M = f(s)$  вийде рівняння прямої, якщо нехтувати першим членом в знаменнику (9.10):

$$M = 2M_{кр} \frac{s}{s_{кр}}, \quad (2.44)$$

або

$$M = B \cdot s, \quad (2.45)$$

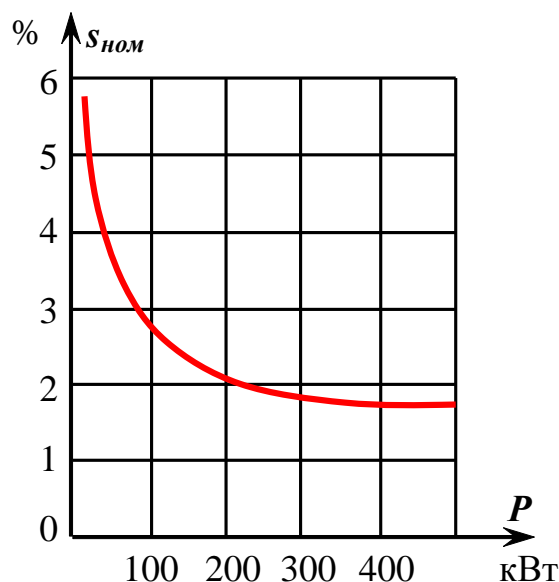
де  $B = \frac{2M_{кр}}{s_{кр}}$ .

Ця лінійна частина характеристики, є її робочою частиною, на якій двигун працює в сталому режимі. На цій же частині характерис-

тики знаходяться точки, відповідні номінальним даним двигуна:  $M_{ном}$ ,  $I_{ном}$ ,  $n_{ном}$ ,  $s_{ном}$ .

*Статичне падіння (перепад) швидкості* у відносних одиницях на природній механічній характеристиці асинхронного двигуна при номінальному моменті визначається його номінальним ковзанням.

Величина номінального ковзання залежить від опору ротора. Найменшим номінальним ковзанням при однаковій потужності і числі полюсів володіють звичайно двигуни з короткозамкнутим ротором нормального виконання. У цих двигунів через конструктивні особливості опір ротора має відносно невелике значення, що веде до зменшення значень критичного ковзання  $s_{кр}$  (2.36) і номінального ковзання  $s_{ном}$ . З тих же причин при збільшенні потужності двигуна зменшується його номінальне ковзання і росте жорсткість власної механічної характеристики. Останнє ілюструється кривий рис. 2.13, побудованої за середніми даними для двигунів різної потужності.



**Рисунок 2.13 – Крива номінального ковзання для АД різної потужності**

Величина критичного моменту, як це видно з (2.37), не залежить від активного опору ротора, критичне ж ковзання згідно (2.36) збільшується у міру збільшення опору ротора. Внаслідок цього у двигунів з фазним ротором при введенні резисторів в коло ротора максимум кривої моменту зміщується у бік великих ковзань.

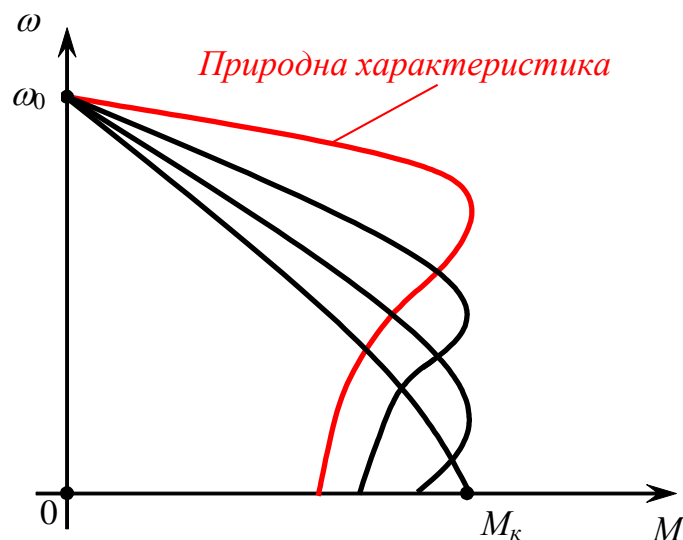
Значення опору, необхідне для побудови природної і реостатних

характеристик двигуна з фазним ротором, визначається з виразу:

$$R_2 = \frac{s_{ном} E_{2к}}{\sqrt{3} I_{2ном}}, \quad (9.16)$$

де  $E_{2к}, I_{2ном}$  – лінійна напруга при нерухомому роторі і номінальний струм ротора.

На рис. 2.14 приведені сімейство реостатних характеристик в режимі двигуна в координатних осях  $M$  і  $\omega$  для різних значень опорів роторного кола. З відомим наближенням реостатні характеристики в робочій їх частині можуть бути прийняті лінійними. Це дає можливість при розрахунку опорів резисторів, що включаються в роторне коло АД, користуватися методами, аналогічними методам, вживаним для розрахунку опору кола якоря двигуна постійного струму незалежного збудження. Деяка неточність у визначення опору резистора вноситься при цьому за рахунок того, що характеристика АД на ділянці графіка від  $M = 0$  до максимального моменту при пуску вважається лінійною.



**Рисунок 2.14 – Власна і реостатні механічні характеристики АД з фазним ротором**

Точнішим є метод, коли випрямлення характеристик проводиться на меншій ділянці. Кратність максимального моменту через  $\lambda =$

$\frac{M_{кр.д}}{M_{ном}}$  повинна бути у двигунів нормального виконання з фазним ротором не нижче 1,8, а у двигунів з короткозамкнутим ротором не нижче 1,7. Двигуни, кранів, відрізняються вищою кратністю максимального моменту. Наприклад, для двигунів з короткозамкнутим ротором серії МТК  $\lambda = 2,3 \div 3,4$ . Двигуни з фазним ротором згаданих серій мають приблизно ті ж величини  $\lambda$ .

Для двигунів з короткозамкнутим ротором істотне значення з погляду електроприводу мають кратності початкового пускового моменту і початкового пускового струму.

### 3 ХІД РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

**Задача № 1.** Підйомний пристрій має кінематичну схему (рис. 1) і наступні дані: швидкість двигуна  $n = \dots$  об/хв,  $J_0 = \dots$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_1 = \dots$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2 = \dots$  кг·м<sup>2</sup>,  $i_1 = i_2 = \dots$ ; ККД кожної пари шестерень  $\eta = \dots$ ,  $D = \dots$  м. Визначити момент інерції для випадку розгону і уповільнення при підйомі вантажу в  $\dots$  т.

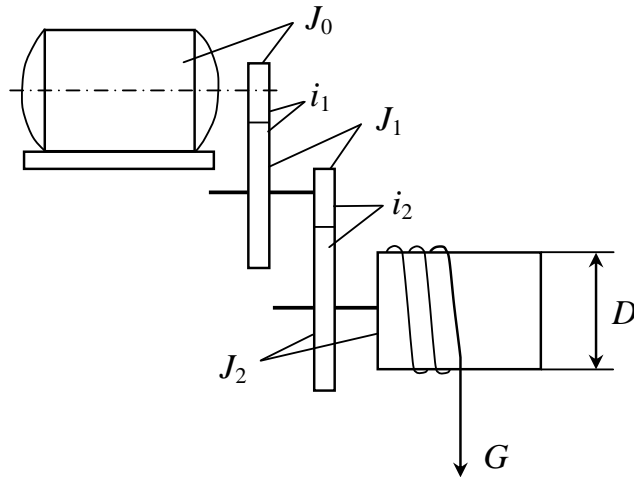


Рисунок 3.1 – Схема підйомного пристрою

#### Розв'язання

Щоб визначити приведений момент інерції, треба знати швидкість підйому вантажу, відповідну заданій швидкості двигуна. Цю швидкість, нехтуючи товщиною каната, можна вважати рівній окружній швидкості барабана

$$v_{\sigma} = \frac{\pi D n}{60 i_1 i_2}, \text{ м/сек.}$$

Кутова швидкість двигуна

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \text{ рад/сек.}$$

При розгоні

$$J_{\text{раз.}} = J_0 + \frac{J_1}{i_1^2 \eta_1} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \eta_1 \eta_2} + \frac{m v_{\sigma}^2}{\omega^2 \eta^2}, \text{ кг·м}^2$$

При гальмуванні

$$J_{\text{тор.}} = J_0 + \frac{J_1 \eta_1}{i_1^2} + \frac{J_2 \eta_1 \eta_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{m \omega^2 \eta}{\omega^2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

**Задача № 2.** Дано двигун типу П91, з паспортними даними  $P_{\text{ном}} = \dots$  кВт,  $U = \dots$  В,  $I_{\text{ном}} = \dots$  А,  $n_{\text{ном}} = \dots$  об/хв.  $R_{\text{я}} = 0,049 R_{\text{ном}}$

1. Двигун працює в режимі динамічного гальмування з швидкістю, рівній половині номінальної, і номінальним струмом якоря.

Знайти величину додаткового опору, включеного в якрне коло, і момент на валу двигуна.

2. Двигун працює в режимі противовмикання із швидкістю  $n = 600$  об/хв. при струмі якоря  $I = 110$  А.

Визначити: величину додаткового опору, включеного в коло якоря; момент на валу двигуна; потужності: споживану з мережі, що підводиться з валу, що поглинається в опорах якрного кола.

3. Двигун працює в генераторному режимі з віддачею енергії в мережу.

Визначити швидкість обертання якоря, якщо струм якоря  $I = 140$  А и  $R_p = 0$ .

### *Розв'язання*

1. **Режим динамічного гальмування.**

Опір якоря двигуна:

$$R_{\text{я}} = 0,049 R_{\text{ном}}, \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт  $c$ :

$$c = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}} \text{ В} \cdot \text{сек/рад,}$$

$$\text{де } \omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi n_{\text{ном}}}{60} \text{ рад/сек.}$$



Електромагнітний момент двигуна при номінальному струмі:

$$M = c \cdot I_{ном}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номінальний момент на валу двигуна:

$$M = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент втрат холостого ходу:

$$M_0 = M - M_{ном}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент на валу двигуна:

$$M_{\epsilon} = M + M_0, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Загальний опір якірного кола (*швидкість дорівнює половині номінальній*):

$$R = \frac{c^2 \omega}{M}, \text{ Ом.}$$

Додатковий опір:

$$R_p = R - R_y, \text{ Ом.}$$

## **2. Режим противовмикання.**

Загальний опір якірного кола:

$$R = \frac{U_{ном} + c\omega}{I}, \text{ Ом,}$$

де  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ , рад/сек.

Додатковий опір:

$$R_p = R - R_y, \text{ Ом.}$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M = c \cdot I, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент на валу двигуна:

$$M_e = M + M_0, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Потужність, що споживається з мережі:

$$P = U \cdot I, \text{ кВт.}$$

Потужність, що поглинається в опорах якірного кола:

$$P_y = I^2 \cdot R, \text{ кВт.}$$

Потужність, що підводиться з валу (без урахування втрат холостого ходу):

$$P_2 = P_y - P, \text{ кВт.}$$

### ***3. Генераторний режим з віддачею енергії в мережу.***

Швидкість обертання якоря:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{c} + \frac{IR_y}{c}, \text{ рад/сек.}$$

$$n = \frac{\omega}{\pi} \cdot 30, \text{ об/хв.}$$

**Задача № 3.** Побудувати природну механічну характеристику для асинхронного двигуна з контактними кільцями типу МТ-63-10 в руховому і генераторному режимах роботи.

### *Розв'язання*

Коефіцієнт трансформації від статора до ротора

$$k = \frac{E_1}{E_{2к}}, ..$$

Приведені опори:

$$\begin{aligned} R'_2 &= R_2 \cdot k^2, \text{ Ом}; \\ X'_2 &= X_2 \cdot k^2, \text{ Ом}; \\ X_{\kappa} &= X_1 + X'_2, \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Величина критичного ковзання

$$\begin{aligned} s_{\kappa} &= \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \\ as_{\kappa} &= \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{\kappa}. \end{aligned}$$

Кутова синхронна швидкість

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}, \text{ рад/сек.}$$

Критичний момент в режимі двигуна (кН·м – кілоньютонметри)

$$M_e = \frac{3U_{\delta}^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}, \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Критичний момент в генераторному режимі

$$M_{\kappa,2} = M_{\kappa,0} \frac{R_l + \sqrt{R_l^2 + X_\kappa^2}}{R_l - \sqrt{R_l^2 + X_\kappa^2}}, \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Рівняння природної механічної характеристики:

$$M = \frac{\pm 2M_\kappa (1 \pm as_\kappa)}{\frac{s}{\pm s_\kappa} + \frac{\pm s_\kappa}{s} \pm 2as_\kappa} = \frac{\pm Q}{\frac{s}{\pm s_\kappa} + \frac{\pm s_\kappa}{s} \pm 2as_\kappa}.$$

а) режим двигуна

$$M_\partial = \frac{Q}{\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s} + 2as_\kappa};$$

б) генераторний режим

$$M_z = \frac{Q}{\frac{s}{-s_\kappa} + \frac{-s_\kappa}{s} - 2as_\kappa};$$

Результати розрахунків зведені в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків

$s$	0	$\pm 0,038$	$\pm 0,1$	$\pm 0,18$	$\pm 0,22$	$\pm 0,25$	$\pm 0,4$	$\pm 0,75$	$\pm 1,0$
$M_D, \text{ кН}\cdot\text{м}$									
$M_G, \text{ кН}\cdot\text{м}$									

За даними табл. 3.1 побудована природна характеристика двигуна (рис. 3.2).

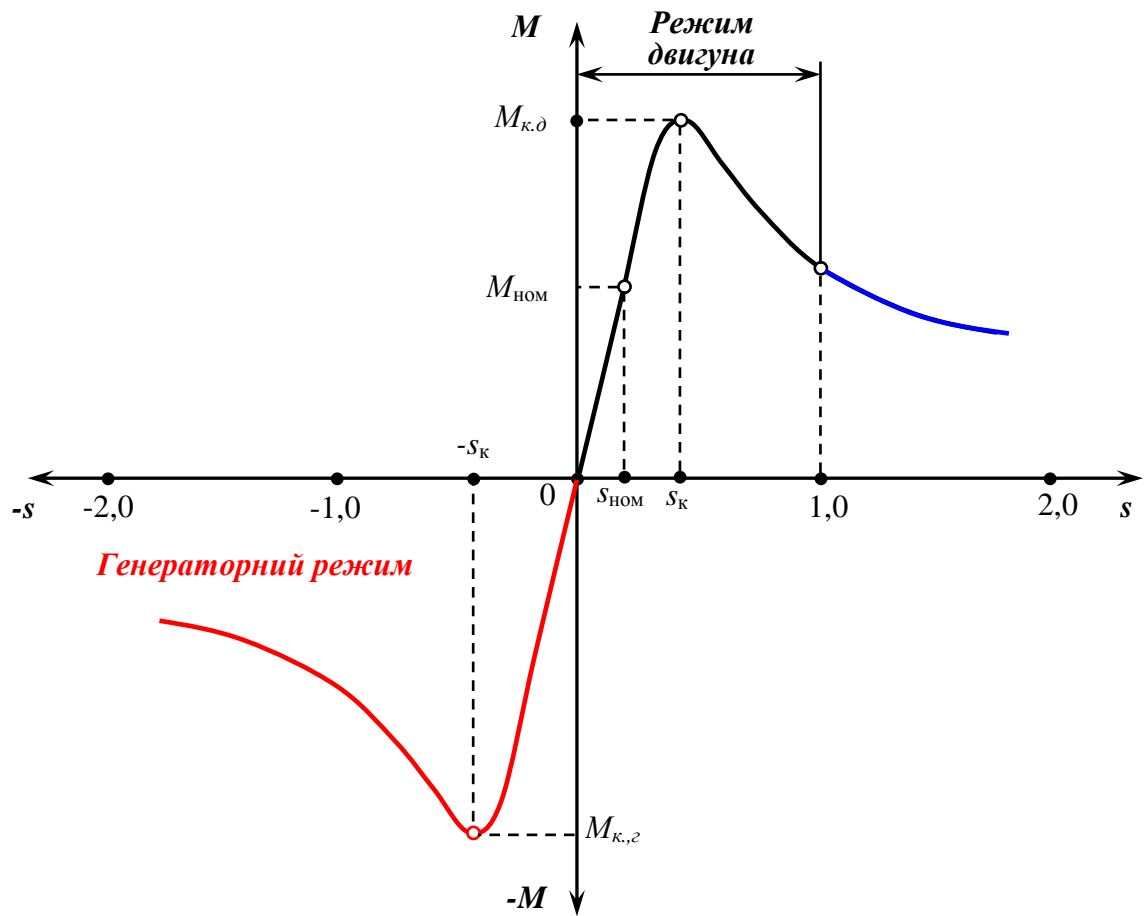


Рисунок 3.2 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна з фазним ротором

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гнатов А.В., Калмиков В.І. Конспект лекцій з дисципліни Теорія електроприводу. Частина 1. «Механічні характеристики електропривода постійного та змінного струму».- Харків.: ХНАДУ, 2009 – 156 с.
2. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. Учебник для вузов.Изд. 5-е доп. и переработ. – М.: Энергия, 1971. – 432 с.
3. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчета автоматизированного электропривода. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.
4. Дьяконов В.И. Расчет электроприводов с линейными асинхронными двигателями. – Иваново, 1973. – 141 с.
5. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
6. Миллер Е.В. Основы теории электропривода. – М.: Высшая школа, 1968. – 408 с.
7. Кацман М.М. Электрические машины и электропривод автоматических устройств: Учебник для электротехнических специальностей техникумов. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
8. В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин Основы электропривода. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
9. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин и др. – М.: Энергия, 1974.
10. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
11. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.
12. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И. – М.: Энергоиздат, 1982. – 364 с.
13. Филиппов Б.А., Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. – М : МЭИ, 1977.