

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

М.В. ПОСТНІКОВА, С.О. КВІТКА, Д.М. НЕСТЕРЧУК

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ПРАКТИКУМ
ЧАСТИНА 1



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

М.В. ПОСТНІКОВА, С.О. КВІТКА, Д.М. НЕСТЕРЧУК

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ПРАКТИКУМ

ЧАСТИНА 1

*Рекомендовано Вченою радою факультету енергетики
і комп'ютерних технологій Таврійського державного
агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного
для підготовки фахівців зі спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
у вищих навчальних закладах II-IV рівнів акредитації*

Мелітополь
2020

УДК 631.3-83 (075.8)

П 63

*Дозвіл до впровадження та видання надано Вченою радою
факультету енергетики і комп'ютерних технологій
Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного
(протокол №10 від «28» травня 2020 р.)*

Укладачі: **Постнікова М.В.**, доцент Таврійського ДАТУ,
Квітка С.О., доцент Таврійського ДАТУ,
Нестерчук Д.М., доцент Таврійського ДАТУ

Рецензенти:

Островецький М.Я., д.т.н., професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Діордієв В.Т., д.т.н., професор, завідувач кафедри електроенергетики і автоматизації Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Постнікова М.В.

П 63 Постнікова М. В., Квітка С. О., Нестерчук Д. М. Основи електропривода : практикум, ч. 1. Мелітополь : Люкс, 2020. 259 с.

Практикум представляє собою збірник практичних робіт, прикладів їх виконання. До кожної практичної роботи приведені стислі теоретичні відомості, приклади рішень проілюстровані графіками і поясненнями, що сприяє більш глибокому засвоєнню теоретичного матеріалу курсу «Основи електропривода» і придбання навиків його практичного застосування.

Практикум з дисципліни «Основи електропривода» призначений для студентів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» вищих навчальних закладів II-IV рівнів акредитації.

© М.В. Постнікова,
© С.О. Квітка,
© Д.М. Нестерчук,
© Таврійський державний
агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, 2020

ЗМІСТ

Передмова	6
<i>Практична робота</i>	
СКЛАДАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	7
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО (НЕЗАЛЕЖНОГО) ЗБУДЖЕННЯ	21
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ	35
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ	52
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	65
<i>Практична робота</i>	
ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ РОЗГОНУ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРОДВИГУН-РОБОЧА МАШИНА» МЕТОДОМ ГРАФОАНАЛІТИЧНОГО ІНТЕГРУВАННЯ РІВНЯННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	78
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ГАЛЬМУВАННІ	92
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ	114

<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЧАСТОТОЮ СТРУМУ	138
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	160
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	173
<i>Практична робота</i>	
РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ	186
<i>Практична робота</i>	
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ	196
<i>Практична робота</i>	
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЗАМІНІ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА РЕГУЛЬОВАНИЙ З ТРИШВИДКІСНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ	213
Список літератури	228
Додатки	231

ПЕРЕДМОВА

Навчальна дисципліна «Основи електропривода» є профільною навчальною дисципліною зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у закладах вищої освіти II - IV рівнів акредитації при підготовці здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр».

Мета практикуму – закріплення та систематизація знань з основ електропривода, розвиток навиків самостійної роботи з використанням спеціальної технічної літератури; підготовка студентів до практичного застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні навчальної дисципліни «Основи електропривода», розвиток навиків розрахунку електроприводів з урахуванням особливостей режимів роботи виробничих механізмів.

Головною метою практичних занять з дисципліни «Основи електропривода» є закріплення та розширення знань, що набувають студенти на лекціях або під час самостійної роботи, а також набуття практичних навиків проведення розрахунків електроприводів постійного і змінного струму.

Практикум містить теми практичних занять, їх мету і програму роботи, завдання для самостійної підготовки, загальні відомості і рекомендації з виконання практичної роботи, приклади розрахунків.

Теми практичних занять тісно пов'язані з лекційними заняттями, які проводяться по курсу «Основи електропривода», що полегшує студенту зрозуміти суть питань, що вивчаються.

В практикумі приведені задачі по приведенню параметрів механічної частини електропривода; з розрахунків механічних і електромеханічних характеристик електроприводів постійного і змінного струму в двигунному та гальмівних режимах; з розрахунків енергетичних показників електроприводів постійного і змінного струму в усталеному та перехідних режимах.

Для детального ознайомлення з методикою розрахунків і орієнтування студентів при самостійному вирішенні задач в практикумі наведені розгорнуті приклади рішення задач.

З міркувань кращого засвоєння матеріалу і набуття належних навиків розв'язання задач, їх контекст у подальших розділах містить елементи попередніх розділів.

Автори сподіваються, що наведений матеріал допоможе студентам краще засвоїти курс дисципліни «Основи електропривода», набути практичних навиків раціонального вибору і розрахунків електроприводів постійного та змінного струму.

СКЛАДАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Мета роботи: навчитися складати розрахункові схеми механічної частини електропривода (ЕП) і визначати зведений момент інерції системи електродвигун-робоча машина.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: статичні та динамічні сили і моменти, що діють в системі електропривод-робоча машина; зведення моментів статичного опору і моментів інерції до вала електродвигуна; рівняння руху електропривода [1, с. 19-44; 3, с. 26-42; 4, 19-29; 5, 26-31; 23].

1.2 Відповісти на контрольні питання.

2 Програма роботи

2.1 Скласти вихідну розрахункову схему механічної частини електропривода вентилятора.

2.2 Вибрати елементи кінематичної схеми: передачу, діаметри тягових і ведених шківів передачі.

2.3 Визначити моменти інерції елементів схеми.

2.4 Скласти зведену схему механічної частини електропривода.

2.5 Визначити загальний зведений момент інерції системи.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

3 Загальні відомості і рекомендації

Механічна частина системи електропривод-робоча машина складається з ротора (якоря) електродвигуна, механічного передавального пристрою (системи передач) і виконавчого органу робочої машини, зв'язаних між собою кінематично.

Залежно від режиму роботи електродвигуна його ротор (якір) може бути джерелом або споживачем механічної енергії.

Механічний передавальний пристрій передає механічну енергію від електродвигуна до виконавчого органу робочої машини і навпаки. Крім того, за допомогою механічного передавального пристрою відбувається перетворення механічної енергії: обертальний рух перетворюється в поступальний або зворотно-поступальний, збільшується або зменшується швидкість руху і т. д. Механічними передавальними пристроями є ланцюгові, пасові, зубчасто-рейкові та інші передачі, редуктори, муфти, шатунно-кривошипні механізми та ін.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Типорозмір електродвигуна	Момент інерції ротора $EД$, $J_{дв}$, кг·м ²	Передаточне число, i , в.о.	Діаметр			Момент опору, $M_{с.н}$, Н·м	Ширина шківів передачі, B , мм
				коліса вентилятора, D_5 , м	тягового шківів, d_1 , мм	веденого шківів, d_2 , мм		
1	АИР71В4	0,0014	0,71	0,3	100	71	2,8	15
2	АИР71В4	0,0014	0,64	0,3	100	71	3,1	15
3	АИР71В4	0,0014	0,59	0,3	100	71	3,0	15
4	АИР80А4	0,0032	0,56	0,3	112	71	3,2	19,5
5	АИР80В4	0,0033	0,51	0,3	125	71	4,2	19,5
6	АИР71А4	0,0013	1,19	0,4	80	100	3,5	15
7	АИР71В4	0,0014	1,09	0,4	100	112	5,0	15
8	АИР80А4	0,0032	0,92	0,4	112	112	6,2	19,5
9	АИР80В4	0,0033	0,81	0,4	125	100	7,8	19,5
10	АИР90L4	0,0056	0,73	0,4	160	125	9,8	19,5
11	АИР100S4	0,0087	0,93	0,5	160	160	15,0	25,5
12	АИР90L4	0,0056	1,05	0,5	160	180	13,2	19,5
13	АИР80В4	0,0033	1,22	0,5	125	160	10,3	19,5
14	АИР80А4	0,0032	1,33	0,5	112	160	9,1	19,5
15	АИР71В4	0,0014	1,42	0,6	100	140	7,0	15
16	АИР80А4	0,0032	1,83	0,6	112	224	12,4	19,5
17	АИР80В4	0,0033	1,63	0,6	125	200	13,6	19,5
18	АИР100S4	0,0087	1,35	0,6	160	224	20,7	25,5
19	АИР100S4	0,0087	1,23	0,6	160	200	23,5	25,5
20	АИР100L4	0,0110	1,14	0,8	200	224	25,6	25,5
21	АИР100S4	0,0087	1,65	0,8	160	315	26,8	25,5
22	АИР100L4	0,0110	1,48	0,8	200	315	31,9	25,5
23	АИР112M4	0,0170	1,37	0,8	160	224	42,0	46,75
24	АИР112M4	0,0170	1,25	0,8	160	224	43,9	46,75
25	АИР132S4	0,0280	1,51	0,8	180	315	62,7	46,75

Виконавчий орган робочої машини реалізує підведену до нього механічну енергію в корисну роботу, являючись таким чином споживачем механічної енергії. Іноді він може бути і джерелом механічної енергії, віддаючи, наприклад, на вал електродвигуна енергію, запасену обертовими частинами, піднятим вгору вантажем тощо.

Робота, яку виконує електродвигун або виконавчий орган робочої машини, визначається з рівняння:

при обертальному русі

$$W_{\omega} = \int_0^t M \cdot \omega \cdot dt ; \quad (1)$$

при поступальному русі

$$W_{\nu} = \int_0^t F \cdot \nu \cdot dt , \quad (2)$$

де M – обертовий момент, Н·м;

ω – кутова швидкість, рад/с;

F – сила, Н;

ν – лінійна швидкість, м/с;

t – час, с.

Механічна потужність визначається як похідна роботи за часом і при обертальному русі становить

$$P = \frac{dW_{\omega}}{dt} = M \cdot \omega ; \quad (3)$$

при поступальному русі

$$P = \frac{dW_{\nu}}{dt} = F \cdot \nu . \quad (4)$$

Сили і моменти, що розвиваються двигунним пристроєм (обертним або лінійним електродвигуном), можуть бути рушійними або гальмівними. Рушійними вони бувають в двигунному режимі роботи, коли двигун приводить у рух виконавчий орган робочої машини, а гальмівними – у гальмівних режимах, коли виконавчий орган робочої машини є джерелом механічної енергії.

Сили і моменти статичних опорів, створювані виконавчими органами робочої машини, поділяються на реактивні і активні.

Реактивними називають сили і моменти статичних опорів, які виникають внаслідок руху як протидія механічної ланки на рух. До них належать сили і

моменти, зумовлені тертям, опором матеріалу при обробці різанням, опором потоку повітря у вентиляторах або рідини у насосах і т. п. Реактивні сили і моменти завжди спрямовані проти руху і при зміні напрямку руху змінюють свій знак. Елементи механічної системи, які створюють реактивні сили і моменти, можуть бути тільки споживачами енергії.

Активні сили і моменти статичних опорів створюються сторонніми джерелами механічної енергії і виникають в механічній системі незалежно від її руху. До них належать сили і моменти, зумовлені тяжінням, стисканням, розтягуванням і скручуванням пружних тіл, силою вітру чи потоку падаючої води. Напрямок дії активних сил і моментів не залежить від напрямку руху і при зміні останнього вони зберігають свій знак. Джерело активної сили або моменту може споживати або віддавати механічну енергію. Так, вантаж, переміщений підйомником, при підніманні споживає механічну енергію від електродвигуна, а при опусканні віддає її електродвигуну, внаслідок чого останній працює в гальмівному режимі.

Механічна частина значної кількості систем електродвигун-робоча машина має складну кінематичну схему з багатьма ланками, які рухаються з різними швидкостями. Рух окремих ланок може бути обертовим, поступальним або складним. Кожний елемент кінематичної схеми має певну пружність, а в з'єднаннях елементів наявні зазори. При теоретичному аналізі такої системи потрібно скласти рівняння руху кожного елемента з урахуванням впливу одного елемента на інший, а потім розв'язати ці рівняння разом. Розрахунок систем таким методом досить складний і проводиться в тих випадках, коли потрібна дуже висока точність (слідкуючі системи металообробних верстатів, радіотелескопів, механізми із гнучкими в'язами, довгими валами тощо).

У більшості випадків розрахунки ведуть із допущеннями, що механічна система складається з абсолютно жорстких елементів, які не деформуються і між якими немає зазорів. При такому допущенні за рухом одного елемента можна одержати інформацію про рух решти елементів системи. Найчастіше таким елементом вважають вал електродвигуна. При цьому реальну багатомасову систему замінюють найпростішою одномасовою без зазорів системою з обертальним рухом, еквівалентною в енергетичному відношенні реальній. Розрахункова схема системи зводиться до узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції J , на яку діє електромагнітний момент двигуна $M_{дв}$ і сумарний, зведений до вала електродвигуна момент статичних опорів M_c , до якого входять всі механічні втрати в системі.

В основу принципу зведення моментів статичних опорів до вала електродвигуна покладена рівність потужності системи до і після зведення.

При зведенні систем з обертовим електродвигуном до найпростішого виду можливі наступні випадки:

- зведення обертового руху до обертового;
- зведення поступального руху до обертового.

Для системи, що складається з електродвигуна M (рисунок 1), одноступінчастої передачі та одного виконавчого механізму BM рівняння балансу потужності дорівнює

$$P_2 \cdot \eta = P_M \quad (5)$$

де P_2 – потужність на валу електродвигуна, Вт;

P_M – потужність, що передається на вал виконавчого механізму, Вт;

η – КПД передачі.

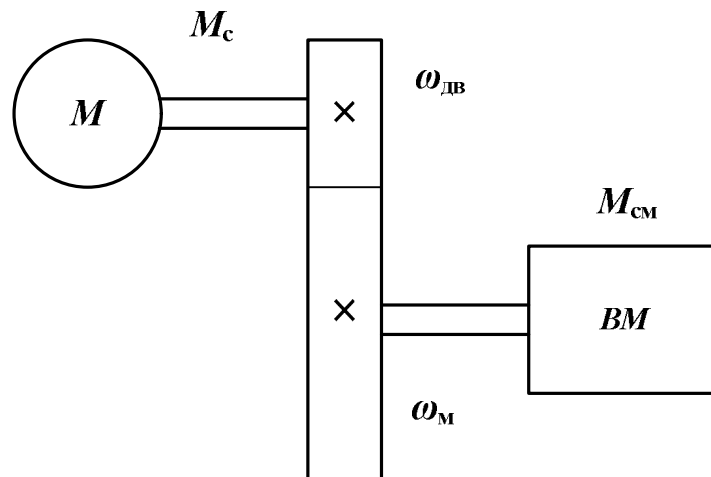


Рисунок 1 – Кінематична схема з обертним виконавчим механізмом

Підставивши значення потужностей з виразу (3), одержимо

$$M_c \cdot \omega_{дв} \cdot \eta = M_{см} \cdot \omega_{м} \quad (6)$$

Звідки зведений до вала двигуна момент статичних опорів дорівнює

$$M_c = M_{см} \cdot \frac{\omega_{м}}{\omega_{дв} \cdot \eta} \quad (7)$$

або

$$M_c = \frac{M_{см}}{i \cdot \eta}, \quad (8)$$

де $i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_{м}}$ – передаточне відношення передачі.

Якщо в системі є наявні елементи з поступальним рухом, наприклад, у підйомних механізмах вантаж масою m піднімається зі швидкістю v (рисунок 2), то з урахуванням (4) рівняння балансу потужностей становить

$$M_c \cdot \omega_{дв} \cdot \eta = F \cdot v, \quad (9)$$

де F – сила тяжіння вантажу, Н·м;
 v – швидкість руху вантажу, м/с.

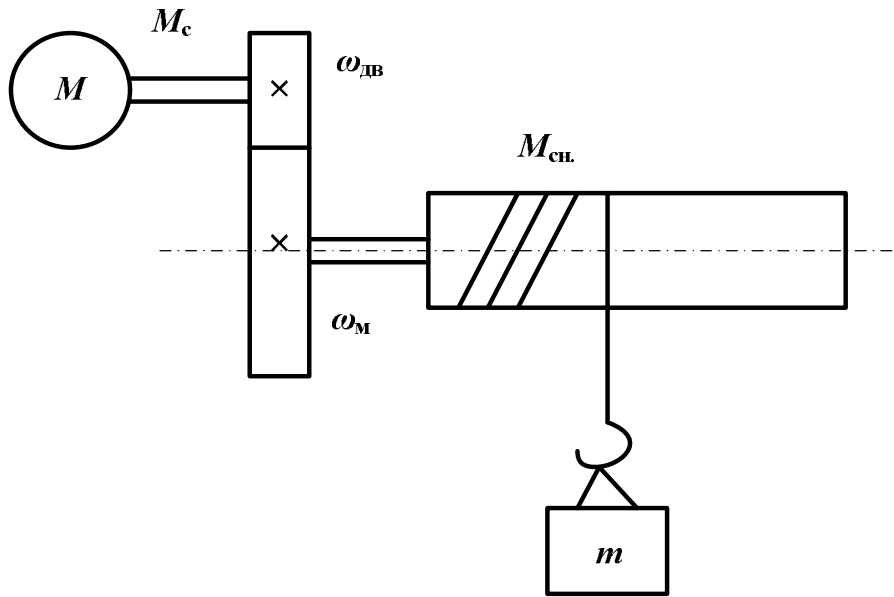


Рисунок 2 – Кінематична схема з ланкою, що рухається поступально

Але

$$F = m \cdot g, \quad (10)$$

де m – маса вантажу, кг;
 g – прискорення земного тяжіння, м/с².

Зведений до вала двигуна момент статичних опорів знаходимо за виразом

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot v}{\omega_{дв} \cdot \eta}. \quad (11)$$

При опусканні вантажу зі швидкістю v двигун працює в гальмівному режимі, момент від сил тертя в механізмах теж має гальмівний характер, тому вираз зведеного моменту має вигляд

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot v \cdot \eta}{\omega_{дв}}. \quad (12)$$

Рівняння балансу потужностей складних систем, які мають обертові виконавчі органи та елементи, що рухаються поступально (рисунок 3), записується

$$P_{дв} = P_{c1} + P_{c2} + \dots + P_{сн} + P_{пост}, \quad (13)$$

де $P_{\text{дв}}$ – потужність на валу двигуна, Вт;

P_{c1}, P_{c2}, P_{cn} – потужність, що витрачається на обертання i -го механізму, Вт;

$P_{\text{пост}}$ – потужність, що витрачається на привод механізму, що рухається поступально, Вт.

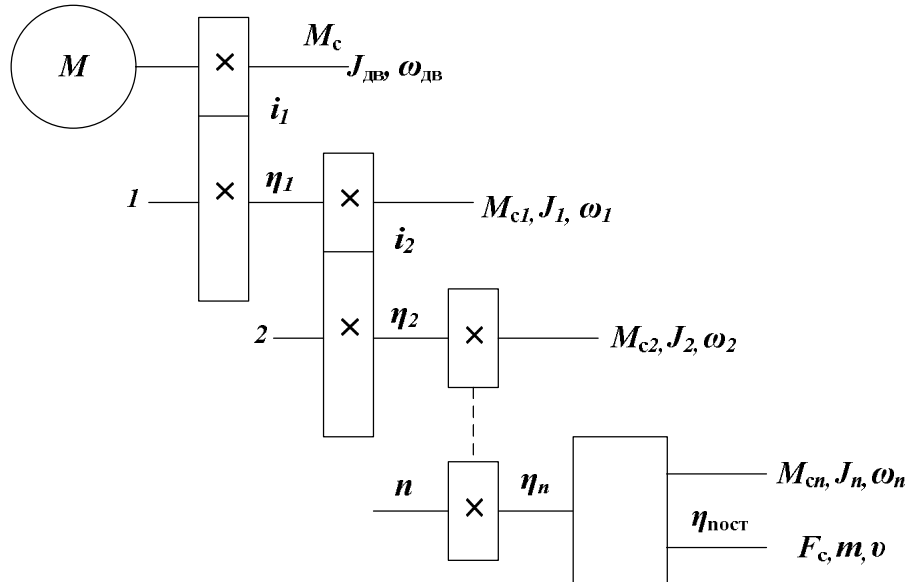


Рисунок 3 – Кінематична схема багатоланкової системи

Підставивши значення потужностей з виразів (3) і (4) і врахувавши втрати потужностей у передачах, рівняння (13) запишемо у вигляді

$$M_c \cdot \omega_{\text{дв}} = \frac{M_{c1} \cdot \omega_1}{\eta_1} + \frac{M_{c2} \cdot \omega_2}{\eta_1 \cdot \eta_2} + \dots + \frac{M_{cn} \cdot \omega_n}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} + \frac{F_c \cdot v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{пост}}}, \quad (14)$$

де M_c – зведений до вала електродвигуна момент статичних опорів системи, Н·м;

$M_{c1}, M_{c2}, \dots, M_{cn}$ – момент статичних опорів окремих елементів системи, які рухаються обертально, Н·м;

$\omega_{\text{дв}}$ – кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – кутові швидкості обертання окремих елементів системи, рад/с;

F_c – статичне зусилля елемента, що рухається поступально, Н;

v – лінійна швидкість елемента, що рухається поступально, м/с;

$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n, \eta_{\text{пост}}$ – відповідно коефіцієнти корисної дії передач між валами системи та передачі до елемента, що рухається поступально.

Розділивши рівняння (14) на $\omega_{\text{дв}}$ одержимо

$$M_c = \frac{M_{c1}}{\eta_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{дв}} + \frac{M_{c2}}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_{дв}} + \dots + \frac{M_{cn}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_{дв}} + \frac{F_c \cdot v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \eta_{пост} \cdot \omega_{дв}}, \quad (15)$$

або

$$M_c = \frac{M_{c1}}{\eta_1 \cdot i_1} + \frac{M_{c2}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot i_1 \cdot i_2} + \dots + \frac{M_{cn}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n} + \frac{F_c \cdot v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \eta_{пост} \cdot \omega_{дв}}, \quad (16)$$

де i_1, i_2, \dots, i_n – передаточні відношення передач між валами системи.

Зведення до вала електродвигуна моментів інерції системи і механічних її мас, які рухаються поступально, виконують на основі рівності запасів кінетичної енергії системи до і після зведення.

Для системи, зображеної на рисунку 3, рівняння балансу кінетичної енергії має вигляд

$$J \cdot \frac{\omega_{дв}^2}{2} = J_{дв} \cdot \frac{\omega_{дв}^2}{2} + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{2} + \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (17)$$

де J – зведений до вала електродвигуна момент інерції системи, кг·м²;

$J_{дв}$ – момент інерції ротора (якоря) електродвигуна і частин, які обертаються на його валу, кг·м²;

J_1, J_2, \dots, J_n – моменти інерції елементів, які обертаються з валами 1, 2, ..., n , кг·м²;

m – маса елементів, кг, які рухаються поступально зі швидкістю v , м/с.

Розділивши рівняння (17) на $\frac{\omega_{дв}^2}{2}$ і замінивши відношення кутових швидкостей на відповідні передаточні числа, одержимо

$$J = J_{дв} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \dots \cdot i_n^2} + \frac{m \cdot v^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (18)$$

Для оцінки динамічних властивостей електропривода при перехідних процесах – пуску, гальмуванні, реверсуванні, переході від однієї швидкості до іншої тощо – користуються показником, який називають *коефіцієнтом інерції системи* FJ . Коефіцієнт інерції – це величина, яка показує, у скільки разів, зведений до вала електродвигуна момент інерції системи $J_{зв}$, більший за мо-

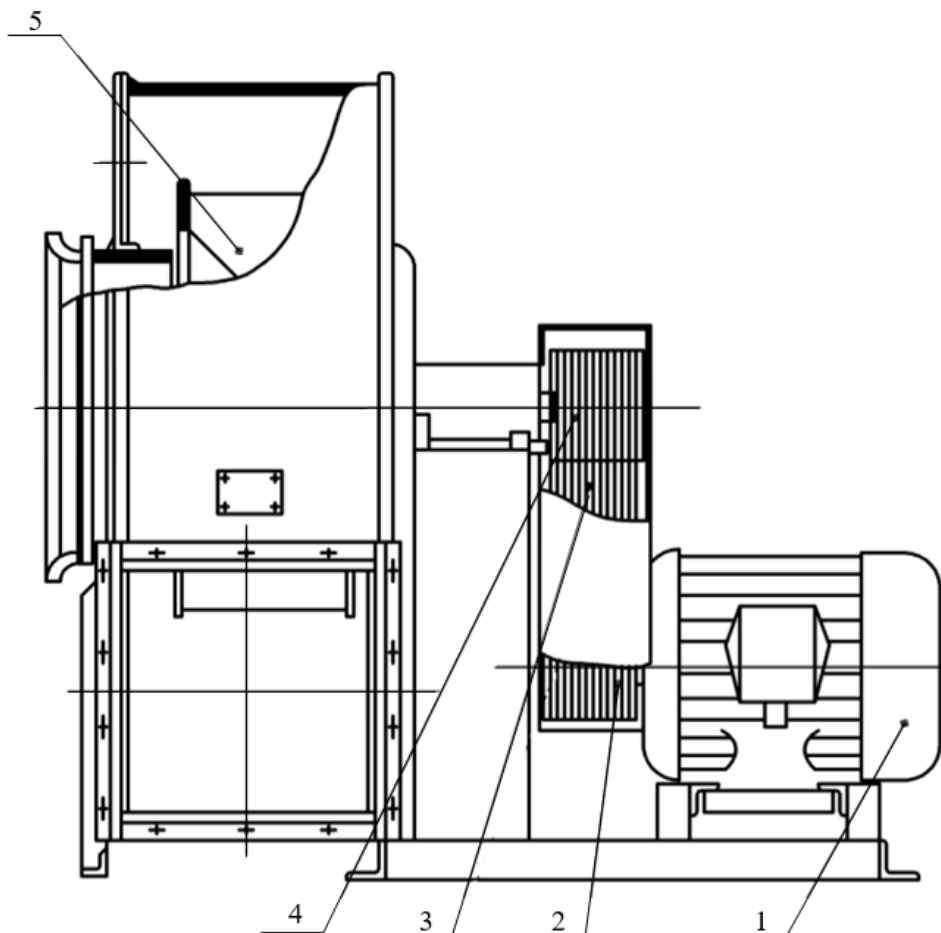
мент інерції ротора двигуна $J_{\text{дв}}$.

$$FJ = \frac{J_{\text{зв}}}{J_{\text{дв}}}. \quad (19)$$

Відповідно до величини показника FJ всі види приводів поділяють на чотири категорії

FJ	Динамічні властивості приводу
$\leq 1,2$	Легкі
1,6; 2,0	Середні
2,5	Важкі
$\geq 4,0$	Дуже важкі

Наприклад, колесо відцентрового вентилятора насаджено на окремий вал, який зв'язаний з валом електродвигуна через пасову передачу (рисунок 4).



1 – електродвигун; 2 – тяговий шків; 3 – пасова передача; 4 – ведений шків;
5 – колесо вентилятора

Рисунок 4 – Конструкція відцентрового вентилятора

На схемі (рисунок 5) зображені чотири елементи, які мають моменти інерції: електродвигун $J_{\text{ДВ}}$, тяговий шків J_2 , ведений шків J_4 , колесо вентилятора J_5 .

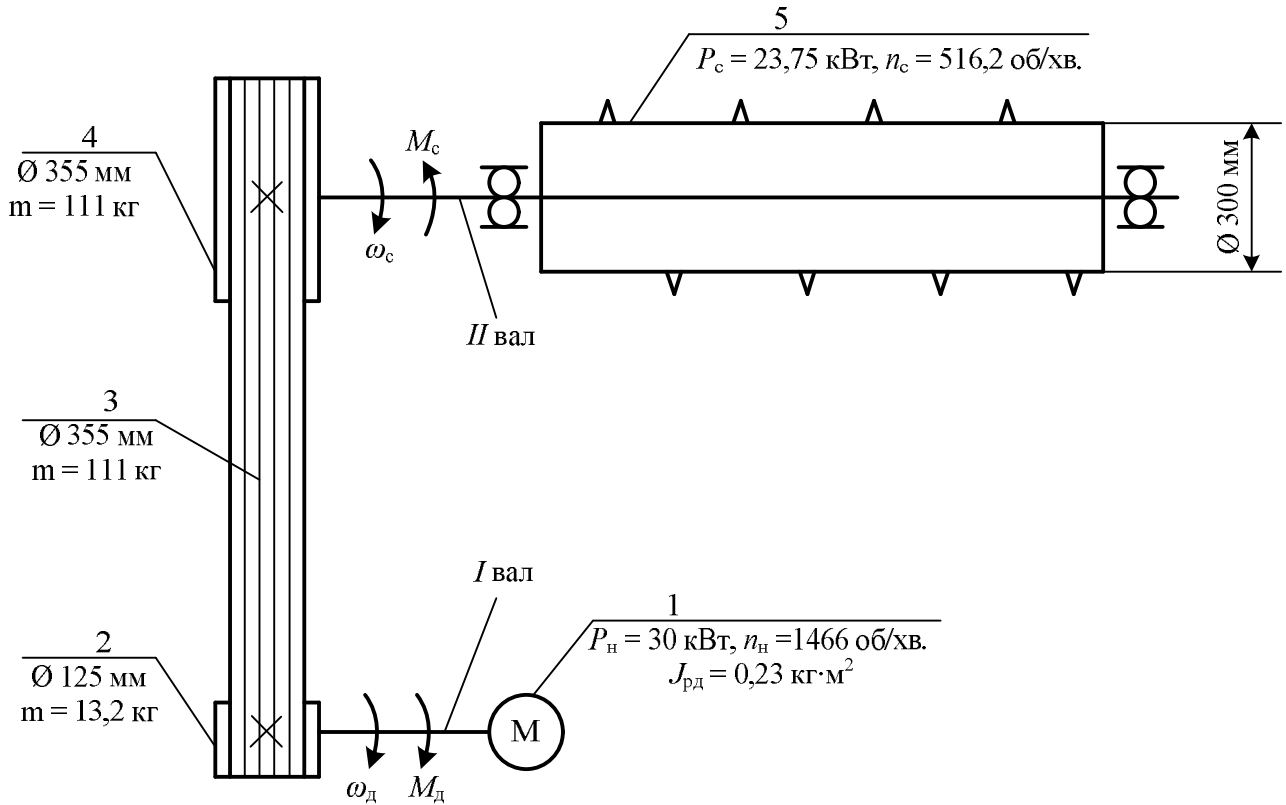


Рисунок 5 – Зразок кінематичної схеми вентилятора

Вихідна розрахункова схема механічної частини електропривода вентилятора представлена на рисунку 6.

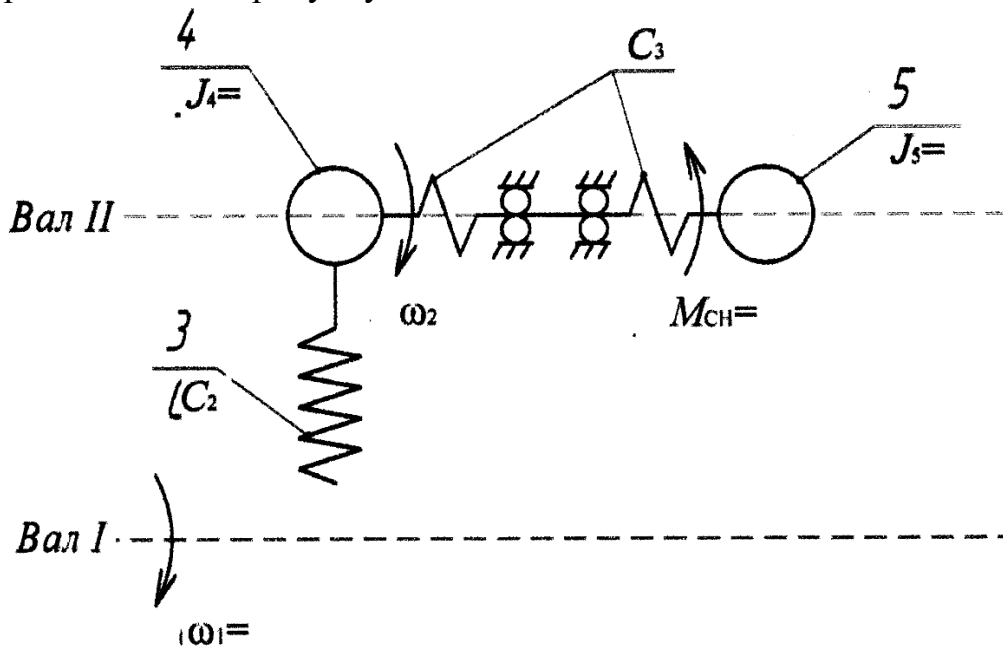


Рисунок 6 – Вихідна розрахункова схема механічної частини електропривода

Моменти інерції обертових частин визначаються за виразом

$$J = \lambda \cdot m \cdot R^2, \quad (20)$$

де λ – коефіцієнт (для пасових шківів $\lambda = 0,7$; для колеса вентилятора $\lambda = 0,8$);

m – маса шківа (або колеса вентилятора), кг;

R – зовнішній радіус шківа (або колеса вентилятора), м.

Маса шківа визначається за формулою

$$m = \rho \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot B \right), \quad (21)$$

де ρ – питома вага сталі, $\rho = 7800$ кг/м³;

d – діаметр шківа, м;

B – ширина шківа, м.

Маса колеса вентилятора визначається за формулою

$$m = 22 \cdot D^2, \quad (22)$$

де D – діаметр колеса вентилятора, м.

За формулою (20) розраховуються моменти інерції: тягового шківа J_2 , веденого шківа J_4 , колеса вентилятора J_5 .

Момент інерції на валу I визначається за формулою

$$J_1 = J_{\text{дв}} + J_2, \quad (23)$$

де J_2 – момент інерції тягового шківа, кг·м².

Момент інерції на валу II визначається за формулою

$$J_{4,5} = J_4 + J_5, \quad (24)$$

де J_4, J_5 – моменти інерції веденого шківа і колеса вентилятора, кг·м².

Момент інерції на другому валу слід привести (перерахувати) до першого вала за формулою

$$J'_{\text{пр2}} = \frac{J_{4,5}}{i^2}, \quad (25)$$

де i – передаточне відношення пасової передачі, в.о.

Загальний зведений момент інерції, який діє на валу I

$$J_{\text{пр}} = J_1 + J'_{\text{пр2}}. \quad (26)$$

Момент опору приводиться до вала електродвигуна за виразом

$$M'_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{сн}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}}, \quad (27)$$

де $\eta_{\text{пер}}$ – ККД передачі, в.о.

4 Приклад розрахунку

Звести до вала електродвигуна моменти статичних опорів і моменти інерції відцентрового вентилятора (рисунок 5).

Вихідні дані для розрахунку вибрати з таблиці 1 згідно варіанта: тип електродвигуна АИР132S4, момент інерції ротора двигуна $J_{\text{дв}} = 0,0280$ кг·м²; передаточне число $i = 1,68$; діаметр колеса вентилятора $D_5 = 0,8$ м; діаметр тягового шківа $d_1 = 180$ мм; діаметр веденого шківа $d_2 = 315$ мм; момент опору тягового шківа $M_{\text{сн}} = 65$ Н·м; ширина шківа передачі $B = 46,75$ мм.

Моменти інерції обертових частин визначаємо за виразом

$$J = \lambda \cdot m \cdot R^2,$$

де λ – коефіцієнт (для пасових шківів $\lambda = 0,7$; для колеса вентилятора $\lambda = 0,8$);
 m – маса шківа (або колеса вентилятора), кг;
 R – зовнішній радіус шківа (або колеса вентилятора), м.

Масу шківа визначаємо за формулою

$$m = \rho \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot B \right),$$

де ρ – питома вага сталі, $\rho = 7800$ кг/м³;

d – діаметр шківа, м;

B – ширина шківа, м.

Визначаємо масу:

$$\text{– тягового шківа } m_2 = 7800 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,18^2}{4} \cdot 0,047 \right) = 9,32 \text{ кг};$$

$$\text{– веденого шківа } m_5 = 7800 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,315^2}{4} \cdot 0,047 \right) = 28,5 \text{ кг}.$$

Масу колеса вентилятора визначаємо за формулою

$$m = 22 \cdot D^2,$$

де D – діаметр колеса вентилятора, м.

$$m_5 = 22 \cdot 0,8^2 = 14,08 \text{ кг.}$$

Визначаємо моменти інерції обертових частин:

$$\text{– тягового шківа } J_2 = 0,7 \cdot 9,32 \cdot 0,09^2 = 0,053 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$\text{– веденого шківа } J_4 = 0,7 \cdot 28,5 \cdot 0,152^2 = 0,461 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$\text{– вентилятора } J_5 = 0,8 \cdot 17,6 \cdot 0,4^2 = 2,25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Визначаємо момент інерції на валу I за формулою

$$J_1 = J_{\text{дв}} + J_2,$$

де J_2 – момент інерції тягового шківа, кг·м².

$$J_1 = 0,028 + 0,053 = 0,081 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Визначаємо момент інерції на валу II за формулою

$$J_{4,5} = J_4 + J_5,$$

де J_4, J_5 – відповідно моменти інерції веденого шківа і колеса вентилятора, кг·м².

$$J_{4,5} = 0,461 + 2,25 = 2,711 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Визначаємо момент інерції на валу II , зведений до першого вала за формулою

$$J'_{\text{пр2}} = \frac{J_{4,5}}{i^2},$$

де i – передаточне відношення пасової передачі, в.о.

$$J'_{\text{пр2}} = \frac{2,711}{1,68^2} = 0,961 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Визначаємо загальний зведений момент інерції, який діє на валу I

$$J_{\text{пр}} = J_1 + J'_{\text{пр2}};$$

$$J_{\text{пр}} = 0,081 + 0,961 = 1,042 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Визначаємо момент опору, зведений до вала електродвигуна за виразом

$$M'_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{сн}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}},$$

де $\eta_{\text{пер}}$ – ККД передачі, в.о.

$$M'_{\text{сн}} = \frac{65}{1,68 \cdot 0,95} = 40,73 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Рисунки конструкції відцентрового вентилятора, кінематичну схему вентилятора, розрахункову схему механічної частини електропривода.
- 4 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Чим зумовлюються в механічних системах активні сили і моменти, реактивні сили і моменти?
- 2 Які сили і моменти в механічних системах можуть споживати або віддавати енергію, тільки споживати механічну енергію?
- 3 Як звести до вала електродвигуна моменти статичних опорів механічної системи, що рухається поступально, що обертається?
- 4 Як звести до вала електродвигуна моменти інерції механічної системи, що рухається поступально, що обертається?
- 5 Що таке коефіцієнт інерції механічної системи?
- 6 Якими рівняннями описуються процеси нерівномірного поступального та обертового руху механічної системи з постійним моментом інерції?
- 7 Яким рівнянням описується процес нерівномірного поступального обертового руху механічної системи з моментом інерції, залежним від кута повороту механізму?
- 8 Що показує кінематична схема електропривода?
- 9 Що називається розрахунковою схемою механічної частини електропривода?
- 10 Які параметри вказуються на розрахунковій схемі механічної частини електропривода?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО (НЕЗАЛЕЖНОГО) ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму (ДПС) паралельного (незалежного) збудження з використанням каталожних даних, навчитися будувати графіки природної та штучних механічних характеристик, пускову діаграму ДПС паралельного (незалежного) збудження.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок механічних характеристик ДПС паралельного (незалежного) збудження з використанням каталожних даних [1, с. 45-50; 2, с. 11-16; 3, с. 48-54; 4, 38-45; 15].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: визначення опору пускових резисторів ДПС паралельного (незалежного) збудження [1, 57-61; 2, с. 22-27; 3, с. 55-57; 4, с. 52-57; 15].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати механічні характеристики двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження.

2.1.1 Природну механічну характеристику.

2.1.2 Штучну механічну характеристику при $U_2 = kU_H$.

2.1.3 Штучну механічну характеристику при $R_p = kR_{я}$.

2.2 Розрахувати і побудувати пускову діаграму для ДПС паралельного (незалежного) збудження.

2.3 Визначити опір пускових резисторів.

3 Загальні відомості і рекомендації

Принципова схема вмикання двигуна постійного струму паралельного збудження наведена на рисунку 1.

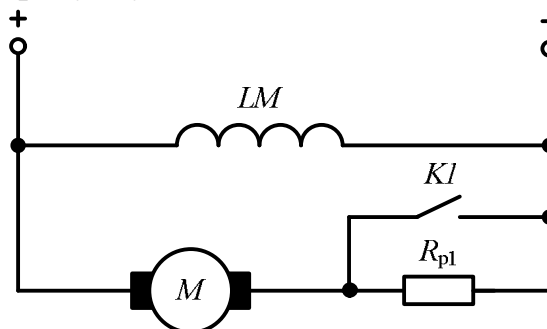


Рисунок 1 – Схема вмикання ДПС паралельного збудження

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Тип електродвигуна	P_H , кВт	U_H , В	I_H , А	n_H , об./хв.	К-сть ступенів	$U_{я} = kU_H$	$R_p = kR_{я}$	$M_1 = kM_H$
1	4ПБМ112МО4	1,4	220	7,6	2300	2	0,8	3	2,5
2	4ПБМ132МО4	3,75	220	19,3	2500	4	0,6	5	2
3	4ПБМ160МО4	2,12	220	11,6	775	3	0,8	7	2,1
4	4ПБМ112МО4	0,45	220	3,0	750	2	0,85	5	2,0
5	4ПБМ160МО4	4,75	220	24,4	1600	3	0,6	6	2,3
6	4ПБМ132МО4	1,12	220	6,7	710	2	0,8	5	2,2
7	4ПБМ112МО4	1,0	220	5,7	1550	2	0,7	2	2,4
8	4ПБМ112МО4	0,63	220	3,8	1060	2	0,9	6	2,2
9	4ПБМ112ЛО4	0,9	220	5,1	1060	2	0,5	7	2,3
10	4ПБМ132МО4	1,6	220	9,0	1030	3	0,9	3	2,0
11	4ПБМ112ЛО4	0,63	220	3,9	750	2	0,6	9	2,2
12	4ПБМ132МО4	2,5	220	13,3	1600	3	0,7	9	2,1
13	4ПБМ112ЛО4	1,85	220	9,8	2240	3	0,85	6	2,2
14	4ПБМ112ЛО4	1,32	220	7,3	1500	3	0,7	5	2,0
15	4ПБМ180МО4	7,1	220	35,6	1500	4	0,8	8	2,0
16	4ПБМ160ЛО4	5,8	220	29,2	1600	3	0,8	5	2,4
17	4ПБМ160МО4	6,5	220	32,7	2240	4	0,75	9	2,0
18	4ПБМ160ЛО4	2,8	220	14,9	750	3	0,7	7	2,2
19	4ПБМ180МО4	11,8	220	58,5	2720	4	0,8	6	2,1
20	4ПБМ132ЛО4	3,15	220	16,5	1450	3	0,8	5	2,2
21	4ПБМ132ЛО4	4,5	220	22,9	2300	4	0,5	4	2,0
22	4ПБМ132ЛО4	1,4	220	8,0	710	2	0,8	3	2,4
23	4ПБМ132ЛО4	2,0	220	10,7	1090	3	0,8	8	2,1
24	4ПБМ160ЛО4	3,75	220	19,5	1030	3	0,7	4	2,2
25	4ПБМ180ЛО4	4,12	220	21,2	750	3	0,9	3	2,3

Усталені (статичні) режими двигуна постійного струму (ДПС) незалежного (паралельного) збудження описуються відомими з курсу електричних машин рівняннями

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R; \quad (1)$$

$$E = k\Phi \cdot \omega; \quad (2)$$

$$M = k\Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (3)$$

де U – напруга, прикладена до якірного кола, В;

$I_{\text{я}} \cdot R$ – спад напруги в якірному колі, В;

$I_{\text{я}}$ – струм у колі якоря, А;

$R = R_{\text{дв}} + R_{\text{д}}$ – сумарний опір якірного кола двигуна, який складається з внутрішнього опору двигуна $R_{\text{дв}}$ та додаткового опору $R_{\text{д}}$, Ом. Внутрішній опір двигуна складається з опору обмотки якоря $r_{\text{я}}$, обмотки додаткових полюсів $r_{\text{дп}}$, компенсаційної обмотки $r_{\text{к}}$ і щіткового контакту $r_{\text{щ}}$, тобто $R_{\text{дв}} = r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{к}} + r_{\text{щ}}$;

E – електрорушійна сила (ЕРС) якоря (залежить від параметрів машини, магнітного потоку Φ і кутової швидкості ω), В;

$k = pN / (2\pi a)$ – конструктивна стала двигуна;

p – число пар полюсів;

N – кількість активних провідників обмотки якоря;

a – кількість паралельних витків обмотки якоря.

В практичних розрахунках потрібно знати номінальний момент на валу $M_{\text{н}}$, (Н·м)

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{н}}}. \quad (4)$$

Номінальна кутова швидкість двигуна $\omega_{\text{н}}$, (рад/с), визначається

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} \approx 0,105 \cdot n_{\text{н}}. \quad (5)$$

Рівняння *статичної електромеханічної характеристики* двигуна постійного струму з будь-яким збудженням має вигляд

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R}{k\Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi}. \quad (6)$$

Електромеханічною характеристикою (ЕМХ) електродвигуна називають залежність його кутової швидкості від струму якоря $\omega = f(I_{\text{я}})$.

Рівняння статичної механічної характеристики ДПС з будь-яким збудженням має вигляд

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot R}{(k\Phi)^2} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi)^2}. \quad (7)$$

Механічною характеристикою (МХ) електродвигуна обертального руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M)$.

З урахуванням виразу $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{\text{н}}}$ – швидкість ідеального холостого ходу, яка має місце при $I_{\text{я}} = 0$ для електромеханічної характеристики і $M = 0$ для механічної характеристики, рівняння електромеханічної характеристики ДПС паралельного (незалежного) збудження має вигляд

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_{\text{н}}} = \omega_0 - \frac{I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_{\text{н}}}, \quad (8)$$

а рівняння механічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{\text{н}}} - \frac{M \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi_{\text{н}})^2} = \omega_0 - \frac{M \cdot (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi_{\text{н}})^2}. \quad (9)$$

Коефіцієнт $k\Phi_{\text{н}}$ визначається з рівняння (8), записаного для точки номінального режиму роботи двигуна

$$k\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}. \quad (10)$$

Механічні характеристики можуть бути природними і штучними. **Природною** механічною характеристикою електродвигуна називають залежність швидкості обертання двигуна від створюваного ним моменту при номінальних параметрах мережі живлення (номінальних значеннях напруги $U_{\text{н}}$ і частоти), номінальному магнітному потоці $\Phi_{\text{н}}$ і при відсутності додаткових опорів у колі якоря (ротора, статора) $R_{\text{д}} = 0$.

Якщо природна механічна характеристика не задовольняє тих або інших вимог виробничого механізму, використовують **штучні** механічні характеристики – залежність кутової швидкості двигуна від його моменту, але при неномінальних параметрах.

Кожний двигун має по одній природній електромеханічній і механічній характеристиці та безліч штучних характеристик.

Природна і штучні механічні характеристики ДПС паралельного (незалежного) збудження в загальному вигляді наведені на рисунку 2.

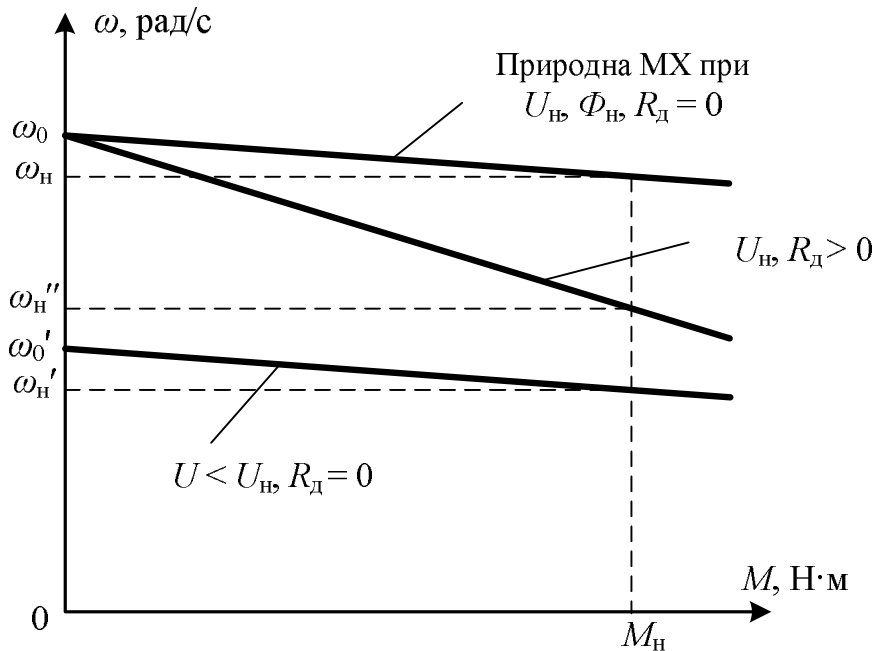


Рисунок 2 – Природна та штучні механічні характеристики ДПС паралельного (незалежного) збудження

Оскільки природна механічна характеристика (рисунок 2) зображується похилою прямою лінією, то її можна побудувати за двома точками, координати яких відповідають наступним значенням:

перша точка $\omega = \omega_0, M = 0$;

друга точка $\omega = \omega_н, M = M_н$.

Якщо внутрішній опір кола якоря електродвигуна (ЕД) невідомий і заводські дані відсутні, то його величину можна приблизно визначити, припускаючи, що половина номінальних втрат потужності $\Delta P_н$ – це втрати в міді обмотки, тобто постійні та змінні втрати при номінальному навантаженні однакові

$$0,5 \cdot \Delta P_н = I_{ян}^2 \cdot R_я;$$

$$R_{дв} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_н) \cdot \frac{U_н}{I_{ян}}, \quad (11)$$

де $\eta_н$ – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна.

Пуск ДПС може бути прямим або непрямим. Прямий пуск застосовують тільки для електродвигунів, які мають порівняно великий внутрішній опір кола якоря і виконується умова

$$I_{прп} \leq I_{я доп} = k \cdot I_{ян},$$

де $k = 2...3$ – кратність допустимого струму якоря.

Для ЕД потужністю понад 0,5 кВт прямий пуск не рекомендується, оскільки при вмиканні безпосередньо на повну напругу електромережі через значний пусковий струм на колекторі ЕД може з'явитися сильне іскріння або навіть коловий вогонь. При цьому на валу ЕД виникає значний динамічний момент, на який можуть бути не розраховані передавальний пристрій і робоча машина, в мережі живлення відбувається значне спадання напруги, ускладнюється робота захисної і вимірювальної апаратури.

Непрямий пуск здійснюється шляхом введення в коло якоря опору пускового реостата або зміни напруги від значення, при якому в колі якоря проходить пусковий струм (не більше допустимого), з подальшим підвищенням його до номінального значення. При одноступінчастому пуску (рис. 1) опір пускового реостата визначають за формулою

$$R_p = \frac{U_n}{I_{я доп}} - R_{дв}. \quad (12)$$

Реостатний пуск двигуна можна здійснювати при плавному зменшенні опору резистора і постійних за величиною значеннях пускового моменту і пускового струму або при ступінчастому зменшенні опору і коливаннях пускового моменту і пускового струму в межах від максимальних до мінімальних значень, допустимих за умовами роботи електропривода.

На практиці найчастіше застосовують ступінчастий пуск. Кількість пускових ступенів, а також межі коливання струмів і моментів при пуску залежать від вимог технологічного процесу. Зазвичай пусковий реостат має не більше 5 ступенів. На рисунку 3 зображена принципова схема реостатного пуску ДПС паралельного збудження в дві ступені.

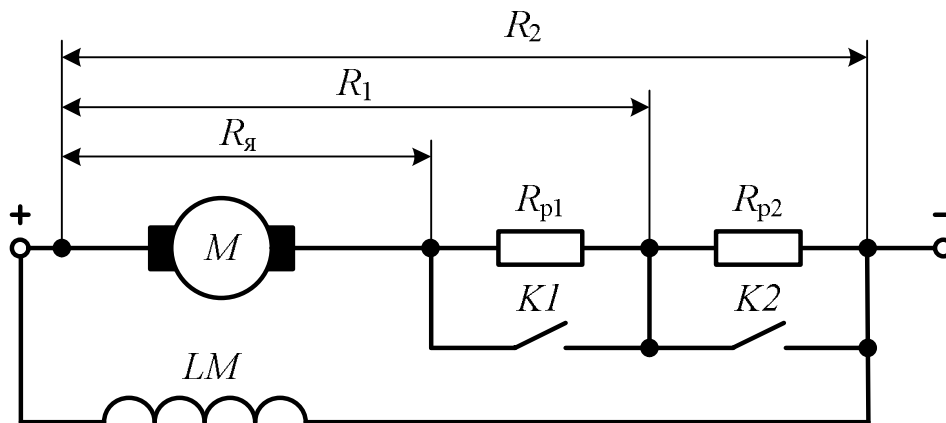


Рисунок 3 – Схема вмикання пускових резисторів ДПС паралельного збудження

Пусковий реостат має дві секції опорів R_{p1} і R_{p2} . Величину пускового струму I_1 приймають за умовами комутації в межах

$$I_1 = (2 \dots 2,5) \cdot I_H.$$

Струм перемикання обов'язково повинен задовольняти умові $I_2 > I_{я0}$. Мінімальне його значення приймають залежно від навантаження на валу ЕД в межах

$$I_2 = (1,1 \dots 1,2) \cdot I_{я0},$$

де $I_{я0}$ – струм якоря при моменті статичних опорів M_c .

Чим менше різниця між I_1 і I_2 , тим більшою буде кількість пускових ступенів. Величини опорів пускових резисторів ДПС паралельного збудження можна визначити графоаналітичним методом.

Пускова діаграма ДПС паралельного збудження з пуском в дві ступені представлена на рисунку 4.

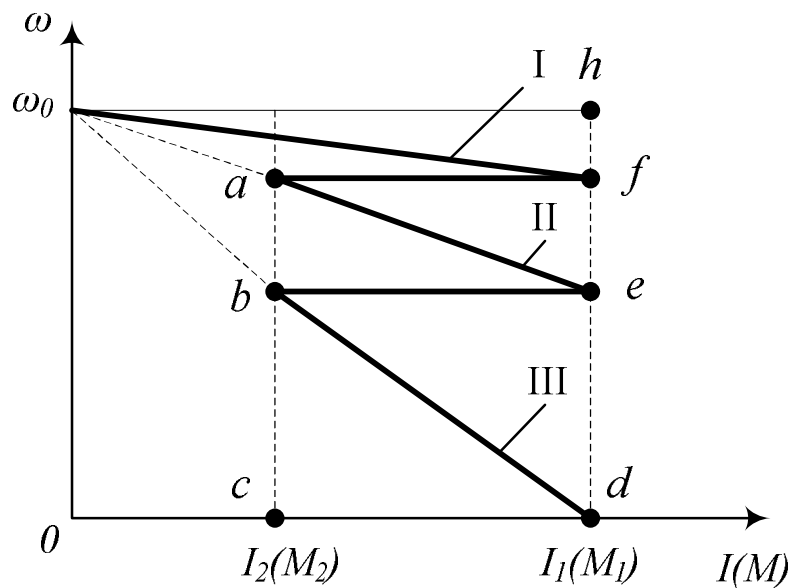


Рисунок 4 – Пускова діаграма ДПС паралельного збудження з пуском в 2 ступені

4 Приклад розрахунку

Для ДПС паралельного збудження типу 4ПБМ112МО4 розрахувати і побудувати природну і штучні механічні характеристики при $U_2 = 0,8U_H$ та $R_p = 3R_я$, пускову діаграму електродвигуна та визначити опір резисторів пускового реостата. Пуск двигуна постійного струму повинен бути виконаний в три ступені, $M_1 = 2M_H$.

Каталожні дані ДПС:

$$P_H = 1,0 \text{ кВт}; \quad U_H = 220 \text{ В}; \quad I_{яH} = 5,7 \text{ А}; \quad n_H = 1550 \text{ об/хв.}$$

Схема пуску ДПС паралельного збудження в три ступені представлена на рисунку 5.

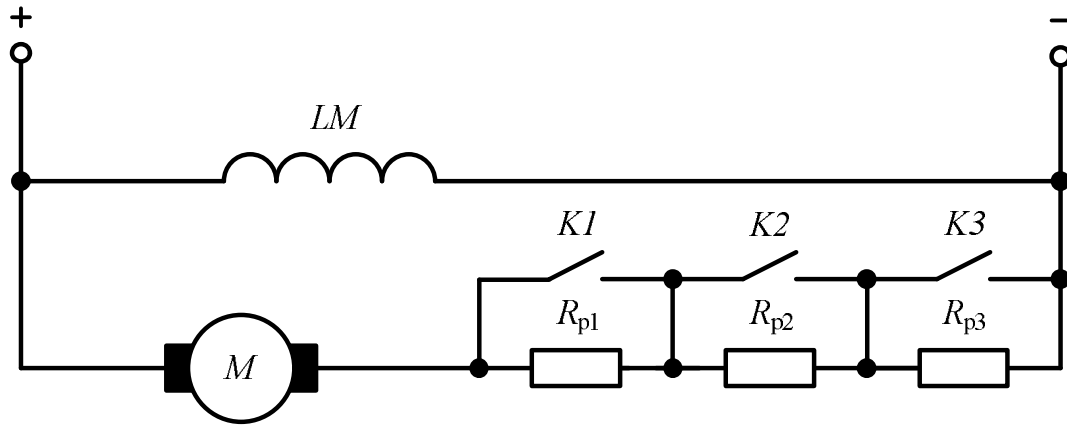


Рисунок 5 – Схема пуску ДПС в три ступені

1 Розрахуємо та побудуємо природну механічну характеристику ДПС паралельного збудження.

Природну механічну характеристику будуємо за двома точками:

перша точка $\omega = \omega_0$, $M = 0$;

друга точка $\omega = \omega_H$, $M = M_H$.

Визначаємо номінальну кутову швидкість

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30},$$

де n_H – номінальна частота обертання двигуна, об/хв.

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1550}{30} = 162,2 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо номінальний момент на валу

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H},$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_H – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

$$M_H = \frac{1,0 \cdot 10^3}{162,2} = 6,16 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо синхронну кутову швидкість за формулою

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H},$$

де k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей двигуна, 1/рад;

Φ_H – номінальний магнітний потік, Вб.

Визначаємо значення коефіцієнта магнітного потоку за формулою

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_{яH} \cdot R_{я}}{\omega_H}.$$

Опір обмотки якоря знаходимо за формулою

$$R_{я} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_{яH}},$$

де η_H – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна, в.о.

Визначаємо номінальний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_H = \frac{P_H}{U_H \cdot I_{яH}};$$

$$\eta_H = \frac{1000}{220 \cdot 5,7} = 0,79;$$

$$R_{я} \approx 0,5 \cdot (1 - 0,79) \cdot \frac{220}{5,7} = 4,05 \text{ Ом};$$

$$k\Phi_H = \frac{220 - 5,7 \cdot 4,05}{162,2} = 1,21 \text{ Вб/рад};$$

$$\omega_0 = \frac{220}{1,21} = 181,8 \text{ рад/с.}$$

За координатами розрахованих точок будуємо природну механічну характеристику ДПС паралельного збудження (рисунок 6).

2. Розрахуємо та побудуємо штучні механічні характеристики ДПС:

а) при зниженій напрузі $U_2 = 0,8U_H$.

Визначаємо кутову швидкість ідеального холостого ходу при $U_2 = 0,8U_H$

$$\omega_{01} = \frac{0,8U_H}{k\Phi_H};$$

$$\omega_{01} = \frac{0,8 \cdot 220}{1,21} = 145,5 \text{ рад/с.}$$

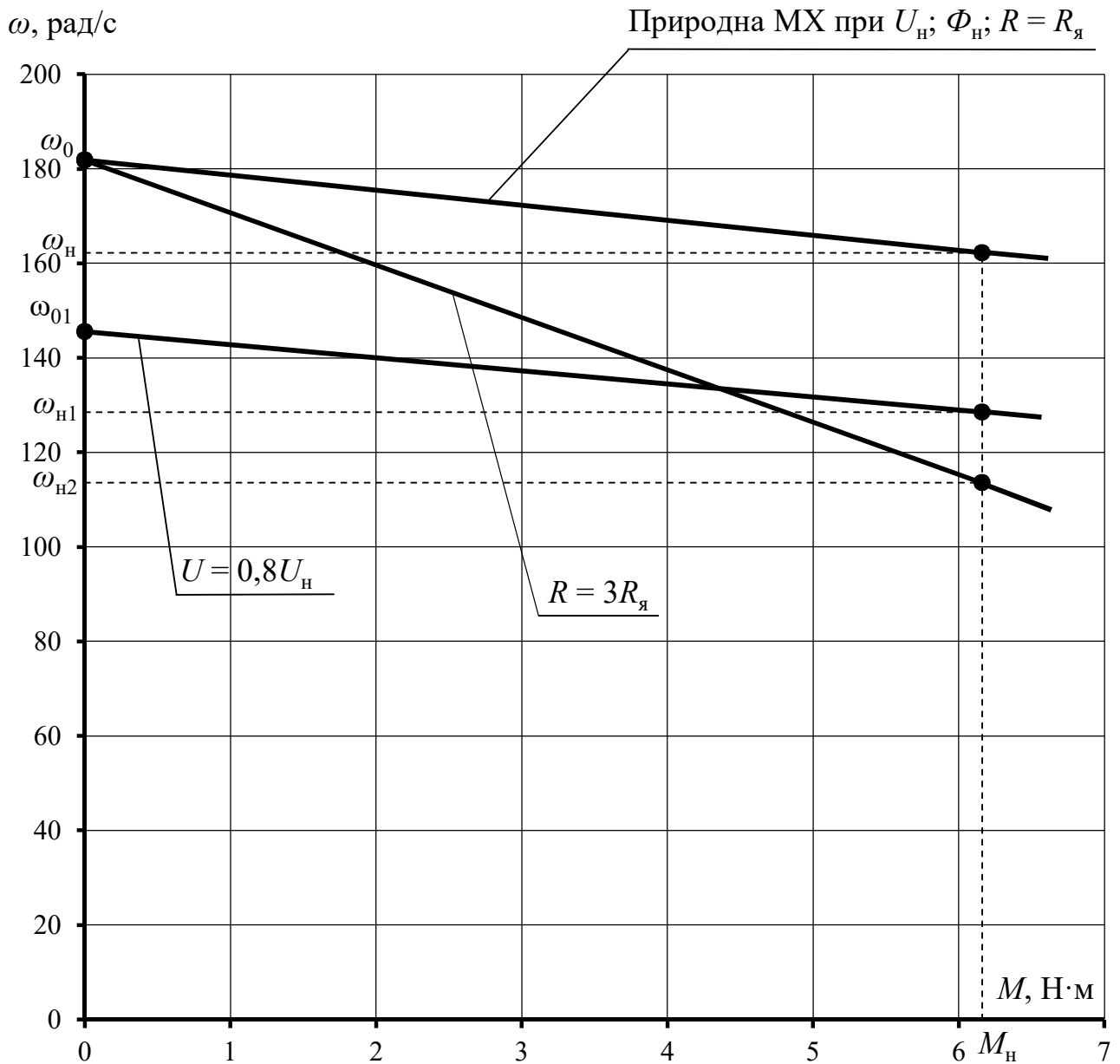


Рисунок 6 – Природна та штучні механічні характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження

Визначаємо кутову швидкість при M_n і $U_2 = 0,8U_n$ за формулою

$$\omega_{n1} = \frac{0,8U_n}{k\Phi_n} - \frac{M_n \cdot R_{я}}{(k\Phi_n)^2} = \omega_{01} - \frac{M_n \cdot R_{я}}{(k\Phi_n)^2};$$

$$\omega_{n1} = 145,5 - \frac{6,16 \cdot 4,05}{1,21^2} = 128,5 \text{ рад/с.}$$

За координатами розрахованих точок будемо штучну механічну характеристику ДПС паралельного збудження при $U_2 = 0,8U_n$ (рисунок 6).

б) при введенні в коло обмотки якоря пускового реостата, опір якого дорівнює $R_p = 3R_{я}$.

Визначаємо кутову швидкість при M_H і $R_p = 3R_{я}$ за формулою

$$\omega_{H2} = \omega_0 - \frac{M_H \cdot (R_{ядв} + R_p)}{(k\Phi_H)^2};$$

Згідно завдання величина опору пускового реостата $R_p = 3R_{я}$. Отже

$$\omega_{H2} = \omega_0 - \frac{M_H \cdot (R_{ядв} + 3R_{я})}{(k\Phi_H)^2} = \omega_0 - \frac{M_H \cdot 4R_{я}}{(k\Phi_H)^2};$$

$$\omega_{H2} = 181,8 - \frac{6,16 \cdot 4 \cdot 4,05}{1,21^2} = 113,6 \text{ рад/с.}$$

За координатами розрахованих точок будуюмо штучну механічну характеристику ДПС паралельного збудження при введенні в коло обмотки якоря пускового реостата, опір якого дорівнює $R_p = 3R_{я}$ (рисунок 6).

Для побудови пускової діаграми двигуна постійного струму паралельного збудження за розрахунковими даними будуюмо природну механічну характеристику $\omega = f(M)$ (рисунок 7) і відмічаємо на ній точки допустимих моментів M_1 і M_2 при перемиканні з однієї ступені резистора на іншу.

При цьому, згідно завдання $M_1 = 2M_H = 2 \cdot 6,16 = 12,32 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Момент M_2 знаходиться в межах $M_2 = (1,1 \dots 1,2) \cdot M_H$ і дорівнює

$$M_2 = 1,2 \cdot 6,16 = 7,39 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Проведемо через точки M_1 і M_2 пунктиром дві паралельні лінії до перетину з характеристикою ідеального холостого ходу в точках a і e .

Для розрахунку опорів пускових резисторів визначаємо масштаб опорів

$$m_R = \frac{R_{я}}{l_{ab}};$$

$$l_{ab} = 22 \text{ мм};$$

$$m_R = \frac{4,05}{22} = 0,18 \text{ Ом/мм.}$$

З'єднуємо точки ω_0 і n . На перетині ліній ω_0n та M_2e відмічаємо точку f . Через точку f проводимо лінію, паралельну осі абсцис, до лінії na і ставимо точку d . Точку d з'єднуємо з точкою ω_0 і на перетині цієї лінії та лінії

M_2e ставимо точку h . Через точку h проводимо лінію, паралельну осі абсцис, до лінії na і ставимо точку c . Аналогічно будемо лінії co_0 і kb .

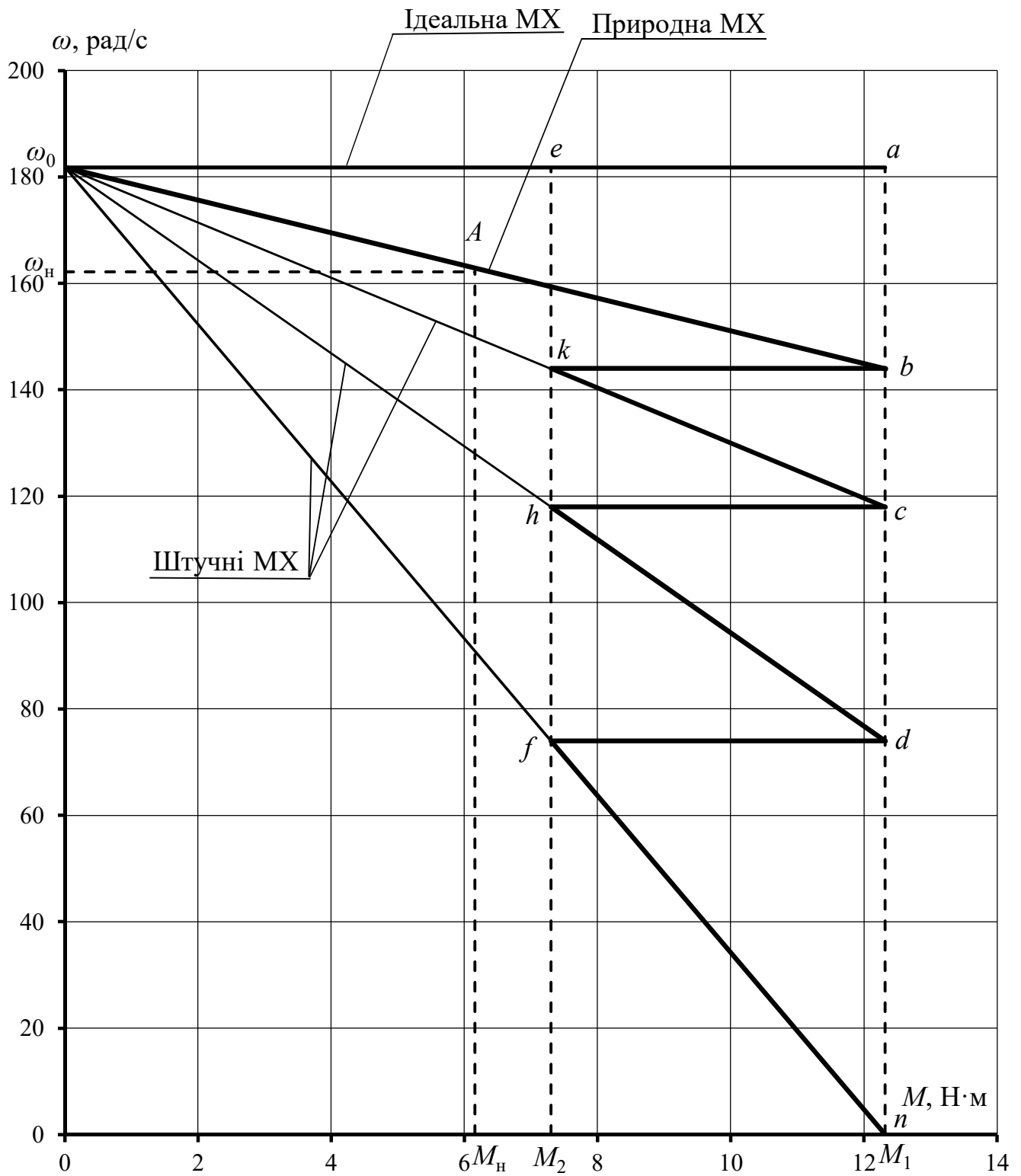


Рисунок 7 – Пускова діаграма двигуна постійного струму паралельного збудження з пуском в три ступені

Побудова пускової діаграми вважається успішною, якщо остання горизонтальна лінія проходить через точку b . Якщо це не відбувається, то побудову необхідно повторити, змінивши значення моменту M_2 .

Визначаємо опір резисторів пускового реостата

$$R_{p1} = m_R \cdot l_{nd};$$

$$R_{p2} = m_R \cdot l_{dc};$$

$$R_{p3} = m_R \cdot l_{cb};$$

$$R_{p1} = 0,18 \cdot 71 = 12,78 \text{ Ом};$$

$$R_{p2} = 0,18 \cdot 46 = 8,28 \text{ Ом};$$

$$R_{p3} = 0,18 \cdot 25 = 4,5 \text{ Ом}.$$

Визначаємо загальний опір пускового реостата

$$R_p = \sum R_{pn};$$

$$R_p = 12,78 + 8,28 + 4,5 = 25,56 \text{ Ом}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули.
- 3 Схему пуску ДПС паралельного збудження з кількістю ступенів пуску згідно індивідуального завдання.
- 4 Природну механічну характеристику ДПС та штучні механічні характеристики, побудовані при різних умовах.
- 5 Пускову діаграму ДПС паралельного збудження.
- 6 Розрахункові дані опорів пускових резисторів.
- 7 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками двигуна постійного струму (ДПС)?
- 2 Що називається природною та штучною характеристиками ДПС?
- 3 Запишіть рівняння електромеханічної та механічної характеристик ДПС незалежного (паралельного) збудження та проаналізуйте їх.

4 Наведіть принципову схему вмикання двигуна постійного струму паралельного збудження.

5 З яких опорів складаються внутрішній опір двигуна і сумарний опір його якорного кола?

6 Від яких величин залежить електрорушійна сила якоря E і електромагнітний момент M_{em} двигуна постійного струму незалежного (паралельного) збудження?

7 Які технічні дані ДПС струму наводяться в його паспортних даних?

8 Як розрахувати і побудувати природні механічну та електромеханічну характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження за паспортними даними?

9 Як визначити кутову швидкість ідеального холостого ходу двигуна постійного струму?

10 Як приблизно визначити величину опору внутрішнього кола якоря двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження за каталожними даними?

10 Як за каталожними даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?

11 Як за каталожними даними визначити номінальний момент двигуна постійного струму (на валу) у двигунному режимі роботи?

12 Як визначити струм якоря двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження у двигунному режимі роботи?

13 Як змінюється кутова швидкість при зміні величини магнітного потоку, опору в колі якоря, напруги, що підводиться?

14 З якою метою при запуску ДПС в коло якоря вводять пусковий резистор?

15 За яким виразом визначається швидкість ДПС паралельного (незалежного) збудження при номінальному моменті та введеному в коло якоря додатковому опору?

16 В яких межах змінюються момент і струм ДПС паралельного збудження при його пуску?

17 Який порядок побудови реостатних характеристик для розрахунку пускових резисторів?

18 Як впливає зміна величини додаткового опору в колі якоря на вид механічної і електромеханічної характеристик ДПС паралельного збудження?

19 Як впливає зміна величини напруги на якорі на вид механічної і електромеханічної характеристик ДПС паралельного збудження?

20 Як впливає зміна величини магнітного потоку на вид механічної і електромеханічної характеристик ДПС паралельного збудження?

21 Який вигляд мають штучні механічні та електромеханічні характеристики ДПС паралельного збудження при зміні опору якорного кола?

22 Який вигляд мають штучні механічні та електромеханічні характеристики ДПС паралельного збудження при зміні напруги?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик (МХ) і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) з використанням каталожних даних і універсальних характеристик, навчитися будувати графіки природної та штучних механічних характеристик, пускову діаграму ДПС послідовного збудження.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок механічних та електромеханічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) з використанням каталожних даних і універсальних характеристик $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$ [1, с. 62-69; 2, с. 27-34; 3, с. 65-68; 4, 67-71; 16].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: визначення опору пускових резисторів ДПС послідовного збудження [1, с. 69-71; 2, с. 34-36; 5, с. 68-70; 16].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати природну механічну характеристику двигуна постійного струму послідовного збудження $\omega = f(M)$.

2.2 Визначити значення опорів додаткових резисторів в колі якоря для зниження швидкості обертання електродвигуна згідно варіанта. Для знайдених значень опорів резисторів розрахувати і побудувати реостатні механічні характеристики $\omega_1 = f(M)$, $\omega_2 = f(M)$.

2.3 Побудувати пускову діаграму ДПС послідовного збудження та розрахувати значення опорів пускових резисторів.

3 Загальні відомості і рекомендації

Схема вмикання двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) (рисунок 1) відрізняється від схеми вмикання ДПС паралельного збудження тим, що обмотка збудження ввімкнена послідовно з обмоткою якоря. Тому його магнітний потік Φ залежить від сили струму в якорному колі, тобто змінюється зі зміною навантаження. Залежність між струмом збудження і магнітним потоком має нелінійний характер і не має точного аналітичного виразу, тому не можна одержати аналітичного виразу МХ ДПС послідовного збудження.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Тип електродвигуна	n_1 , об./хв.	n_2 , об./хв.	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об./хв.	Кількість ступенів
1	4ПБМ160МО4	800	400	3,0	220	15,8	1060	2
2	4ПНМ132МО4	700	500	2,5	220	14,3	1000	2
3	4ПБМ160ЛО4	1100	600	5,8	220	29,2	1600	2
4	4ПБМ180ЛО4	1000	700	8,5	220	42,3	1450	2
5	4ПБМ180МО4	1500	700	10,0	220	49,6	2180	3
6	4ПНМ180ЛО4	900	500	18,5	220	94,7	1400	3
7	4ПНМ180МО4	1300	500	25,0	220	131,7	2240	2
8	4ПБМ160ЛО4	600	400	2,8	220	14,9	750	2
9	4ПБМ180МО4	600	300	5,0	220	25,5	1030	2
10	4ПНМ160ЛО4	700	400	6,3	220	32,6	1060	2
11	4ПНМ160ЛО4	1400	800	16,0	220	81,4	2000	2
12	4ПБМ180ЛО4	500	300	4,12	220	21,2	750	2
13	4ПНМ180МО4	1000	700	15,0	220	76,6	1500	2
14	4ПНМ160МО4	1500	800	13,0	220	67,5	2120	2
15	4ПНМ180ЛО4	350	180	7,1	220	37,5	750	3
16	4ПНМ160МО4	1100	800	7,5	220	39,9	1500	3
17	4ПНМ180МО4	500	300	5,6	220	30,0	710	3
18	4ПНМ132ЛО4	700	400	3,15	220	18,4	1000	2
19	4ПНМ132ЛО4	1300	600	8,5	220	44,5	2240	2
20	4ПБМ160ЛО4	1350	650	8,0	220	39,7	2180	3
21	4ПБМ180МО4	1100	700	7,1	220	35,6	1500	3
22	4ПБМ160ЛО4	1700	800	9,5	220	46,9	2650	3
23	4ПНМ132МО4	900	500	4,0	220	21,5	1500	2
24	4ПНМ180МО4	800	450	8,0	220	41,1	1120	3
25	4ПНМ180ЛО4	700	400	11,0	220	57,2	1000	3

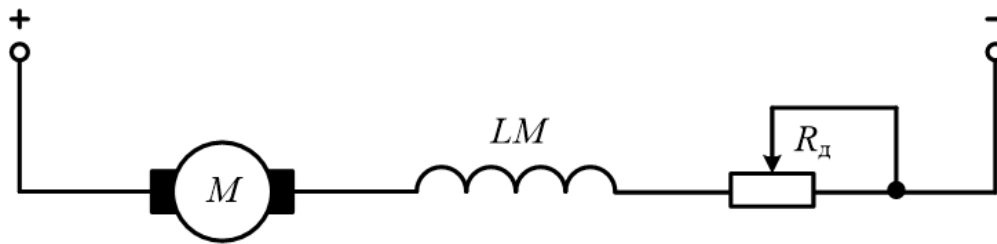


Рисунок 1 – Схема вмикання ДПС послідовного збудження

Для електродвигуна послідовного збудження рівняння електромеханічної характеристики, як і для двигуна незалежного збудження, має вигляд

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R}{k\Phi}, \quad (1)$$

де $R = R_{\text{дв}} + R_{\text{д}}$ – сумарний опір якірного кола двигуна, який складається з внутрішнього опору двигуна $R_{\text{дв}}$ та зовнішнього додаткового опору $R_{\text{д}}$, Ом.

До внутрішнього опору двигуна $R_{\text{дв}}$ входять опори обмотки якоря $r_{\text{я}}$, обмотки додаткових полюсів $r_{\text{дп}}$, обмотки збудження $r_{\text{з}}$ та щіткового контакту $r_{\text{щ}}$, тобто $R_{\text{дв}} = r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{з}} + r_{\text{щ}}$.

Побудувати дійсні природні електромеханічну (ЕМ) і механічну (МХ) характеристики ДПС ПЗ при практичних розрахунках можна за допомогою наведених в каталогах універсальних характеристик $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$, які у відносних одиницях (рисунок 2) виражають залежність швидкості обертання і моменту на валу двигуна від струму якоря при номінальній напрузі і відсутності зовнішніх додаткових опорів у якірному колі. Універсальні характеристики визначають експериментально, тому вони враховують насичення магнітного кола і вплив реакції якоря двигуна.

За універсальними характеристиками (рисунок 2) і номінальними значеннями $I_{\text{н}}$, $M_{\text{н}}$, $\omega_{\text{н}}$ складають розрахункову таблицю 2 і за її даними будують природні ЕМ і МХ двигуна. Спочатку за універсальними характеристиками заповнюють три перші рядки розрахункової таблиці 2, а потім визначають координати природних електромеханічної і механічної характеристик.

У перший рядок записують ряд довільних значень струмів і за універсальними характеристиками $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$ знаходять відповідні значення M_1^* , M_2^* , ..., M_i^* та швидкості ω_1^* , ω_2^* , ..., ω_i^* і записують їх відповідно у другий і третій рядки таблиці 2. Рядки 4-6 заповнюють даними в іменованих одиницях, знаходячи їх за рівняннями

$$M_i = M_{\text{н}} \cdot M^*; \quad \omega_i = \omega_{\text{н}} \cdot \omega^*.$$

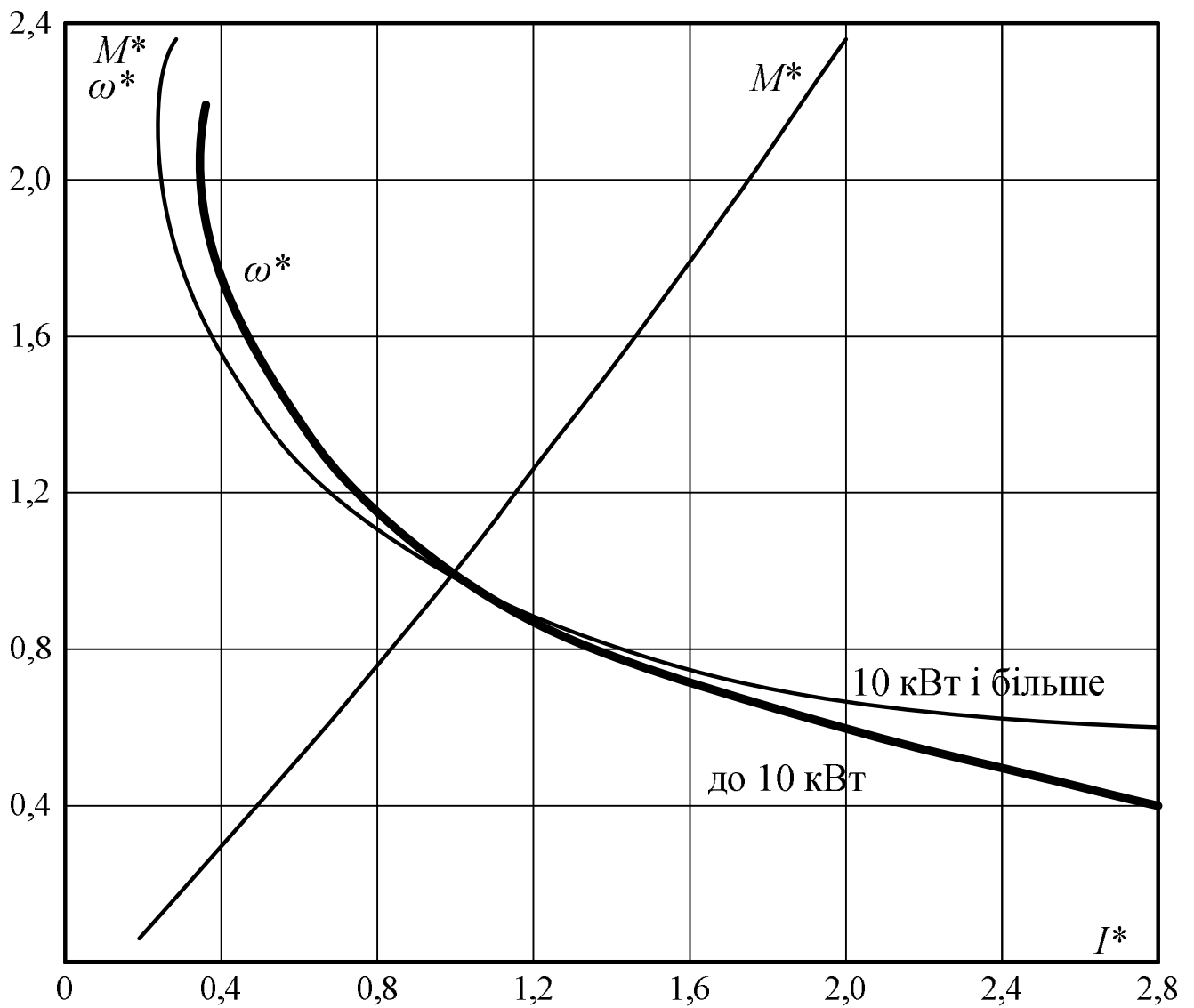


Рисунок 2 – Залежність моменту і кутової швидкості від струму якоря ДПС послідовного збудження (у відносних одиницях)

Таблиця 2 – Розрахункові значення для побудови природної механічної і електромеханічної характеристик ДПС послідовного збудження

I^* , в.о.	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
M^* , в.о.	0,35	0,55	0,78	1,0	1,3	1,5	1,75	2,1	2,3
ω^* , в.о.	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,85	0,8	0,75	0,70
I , А									
M , Н·м									
ω , рад/с									

За даними розрахункової таблиці 2 будують природну механічну характеристику ДПС ПЗ (рисунок 3).

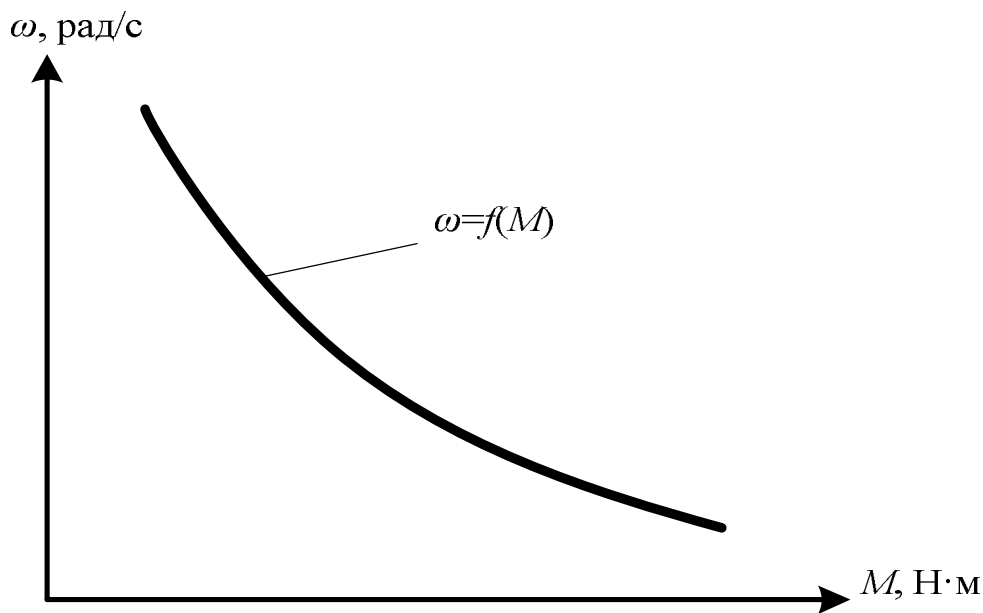


Рисунок 3 – Природна механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження

Рівняння штучної реостатної електромеханічної характеристики має вигляд

$$\omega_{шт} = \omega_{пр} \cdot \frac{U_H - I_{я} \cdot (R_{дв} + R_d)}{U_H - I_{я} \cdot R_{дв}}. \quad (2)$$

Потрібні для розрахунку значення $R_{дв}$ знаходять у каталогах, експериментально або за наближеною формулою

$$R_{дв} \approx 0,75 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_{яH}} \approx 0,75 \cdot (1 - \eta_H) \cdot R_H. \quad (3)$$

Коли відомі координати хоча б однієї точки штучної електромеханічної характеристики (ω_i, I_i) , то для визначення додаткового опору розв'язують рівняння (2) відносно R_d і для струму I_i на природній характеристиці знаходять відповідну швидкість

$$R_d = \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_H} \right) \cdot (R_H - R_{дв}). \quad (4)$$

Із збільшенням опору швидкість двигуна при тому самому моменті зменшується і характеристика зміщується вниз (рисунок 4). Жорсткість характеристики зменшується з ростом додаткового опору в якірному колі.

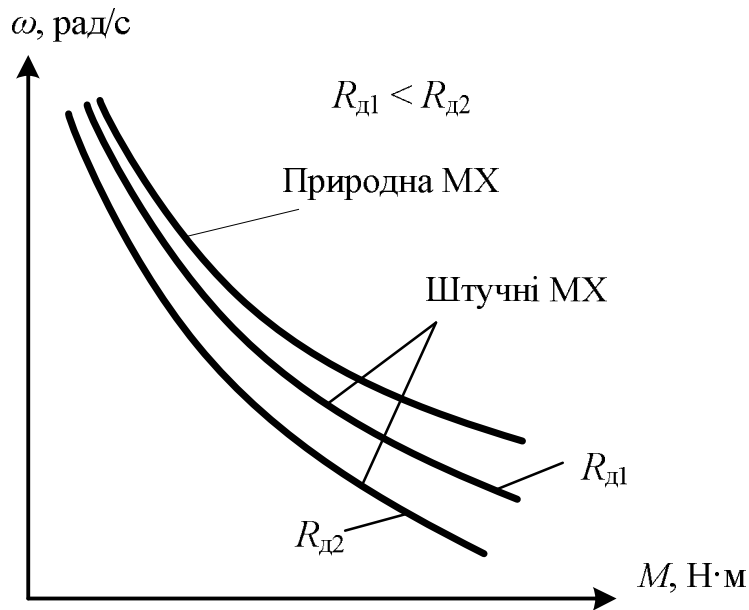


Рисунок 4 – Природна та штучні механічні характеристики ДПС послідовного збудження

Особливістю механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження є неможливість отримання режиму ідеального холостого ходу. При навантаженні нижче 15-20 % від номінального, робота двигуна практично недопустима через надмірне збільшення швидкості якоря.

Розрахунок опорних резисторів для пуску двигуна послідовного збудження виконується графоаналітичним методом, який не вимагає побудови самих реостатних характеристик.

За даними таблиці 2 у першому квадранті будують природну електромеханічну характеристику (ЕМХ) ДПС ПЗ $\omega = f(I)$ (рисунок 5). Задаються значеннями пускового струму I_1 та струму перемикавання I_2 . Проводять через знайдені значення струмів дві вертикальні лінії до перетину з природною електромеханічною характеристикою і відмічають на природній характеристиці точки e і f , які відповідають цим струмам.

При цьому

$$I_1 = (1,8 \dots 2,5) \cdot I_H; \quad (5)$$

$$I_2 = (1,2 \dots 1,5) \cdot I_H. \quad (6)$$

У другому квадранті (рисунок 5) будують залежності $\omega = f(R_1)$ і $\omega = f(R_2)$. Для цього у вибраному масштабі на осі абсцис відкладають опір якорного кола двигуна $R_{дв}$ – відрізок OK і проводять вертикаль з точки K . З точок e і f проводять горизонтальні лінії до перетину з вертикаллю, проведеною з точки K і точки перетину позначають буквами E і F , які є першими точками прямих $\omega = f(R_1)$ і $\omega = f(R_2)$. Друга точка прямих $\omega = f(R_1)$ і

$\omega = f(R_2)$ лежить на осі абсцис. При цьому $\omega = 0$; $R_1 = \frac{U}{I_1}$; $R_2 = \frac{U}{I_2}$.

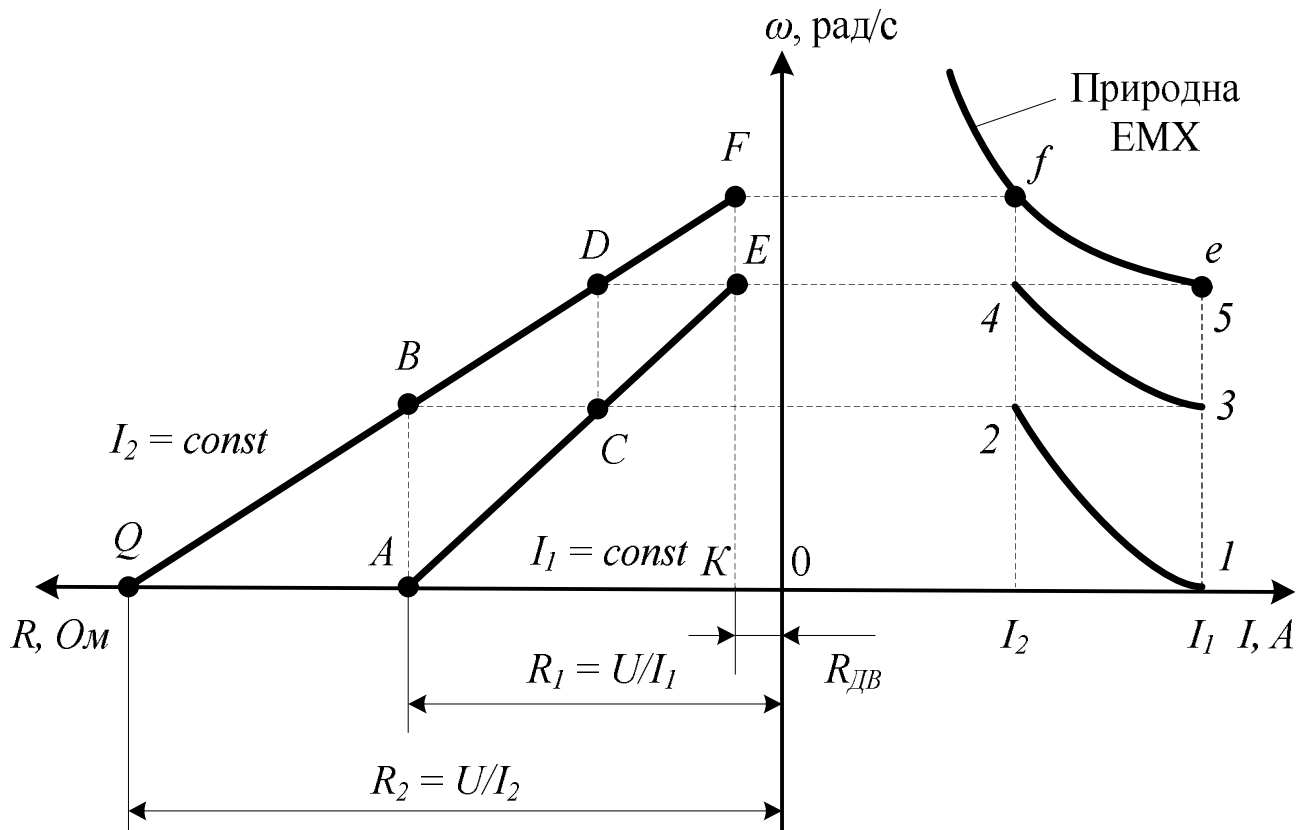


Рисунок 5 – Графічний метод визначення опорів пускових і гальмівних резисторів

У масштабі на осі абсцис відкладають значення опорів R_1 і R_2 (відповідно точки A і Q). З'єднують точки A і E та точки Q і F , одержують лінії $I_1 = \text{const}$ і $I_2 = \text{const}$, які характеризують лінійну залежність між швидкістю двигуна і опором його якірного кола при незмінному струмі якоря.

Пуск двигуна починається при найбільшому опорі пускового резистора R_1 . Під дією пускового моменту двигун розганяється на штучній характеристиці $1-2$, його швидкість зростає (пряма AB), а струм спадає до значення I_2 . При цьому закорочується перша секція пускового резистора і струм зростає раптово до I_1 (пряма BC або $2-3$). Далі двигун буде розганятися відповідно до характеристики $3-4$. Його струм знову зменшується до I_2 (точка D), а після закорочення другої секції пускового реостата зростає до I_1 (пряма DE або $4-5$), після чого двигун переходить на природну електромеханічну характеристику і обертається із швидкістю, що відповідає його навантаженню. Якщо в результаті побудови, горизонтальна лінія, проведена з точки D , не попаде в точку E або з точки 4 в точку 5 , що лежить на природній електромеханічній ха-

рактеристиці, то слід змінити I_2 або I_1 (найчастіше змінюють тільки I_2) і повторити побудову. Після такої побудови величини опорів секцій пускового резистора знаходять з рисунка 5, тобто відрізок BC в масштабі дорівнює опору першої секції, а відрізок DE – опору другої секції.

Перша ступінь пускового резистора дорівнює

$$R_{p1} = l_{BC} \cdot m_R, \quad (7)$$

де m_R – вибраний масштаб опорів, Ом/мм.

Друга ступінь пускового резистора дорівнює

$$R_{p2} = l_{DE} \cdot m_R, \quad (8)$$

Повний опір резистора пускового реостата дорівнює

$$R_p = R_{p1} + R_{p2}. \quad (9)$$

4 Приклад розрахунку

Для електродвигуна постійного струму послідовного збудження типу 4ПНМ180ЛО4 розрахувати і побудувати природну механічну характеристику, визначити значення опорів додаткових резисторів в колі якоря для зниження швидкості обертання електродвигуна при $I = I_n$ до 700 об/хв. і 400 об/хв. Для знайдених значень опорів резисторів розрахувати і побудувати реостатні механічні характеристики.

Каталожні дані ДПС послідовного збудження:

$$P_n = 11,0 \text{ кВт}; \quad U_n = 220 \text{ В}; \quad I_{ян} = 57,2 \text{ А}; \quad n_n = 1000 \text{ об/хв.}$$

Побудувати пускову діаграму електродвигуна і розрахувати значення опорів пускових резисторів. Пуск ДПС повинен бути виконаний в 3 ступені.

Схема пуску двигуна постійного струму послідовного збудження в три ступені представлена на рисунку 6.

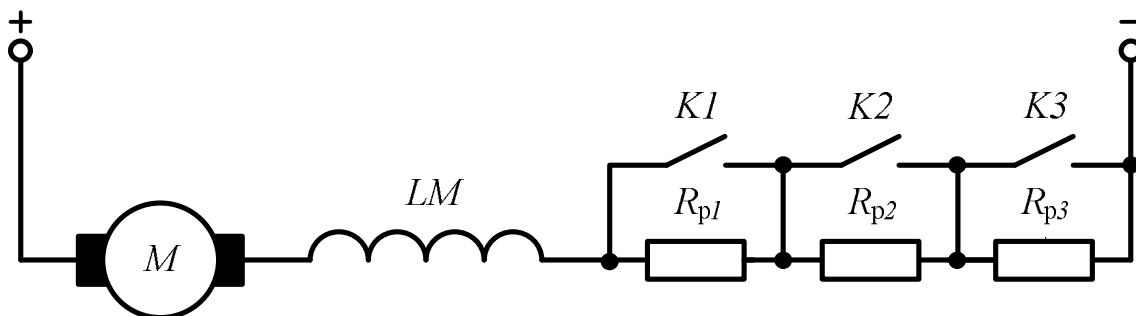


Рисунок 6 – Схема пуску ДПС послідовного збудження в три ступені

Універсальні характеристики приведені на рисунку 2.
Відносні величини визначаємо з рівнянь

$$I^* = \frac{I_i}{I_H}; \quad M^* = \frac{M_i}{M_H}; \quad \omega^* = \frac{\omega_i}{\omega_H}.$$

Знаходимо номінальний момент і номінальну кутову швидкість для ДПС

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H},$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_H – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30},$$

де n_H – номінальна частота обертання, об/хв.

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$M_H = \frac{11,0 \cdot 10^3}{104,67} = 105,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахункові значення для побудови природних механічної $\omega = f(M)$ та електромеханічної $\omega = f(I)$ характеристик ДПС ПЗ представляємо у вигляді таблиці 3. Розрахункові величини знаходимо за виразами

$$I = I^* \cdot I_H; \quad M = M^* \cdot M_H; \quad \omega = \omega^* \cdot \omega_H.$$

Таблиця 3 – Розрахункові значення для побудови природної механічної і електромеханічної характеристики ДПС ПЗ

I^* , в.о.	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
M^* , в.о.	0,18	0,29	0,52	0,76	1,0	1,26	1,5	1,8	2,07	2,47
ω^* , в.о.	1,8	1,58	1,28	1,1	1,0	0,89	0,81	0,75	0,7	0,68
I , А	17,16	22,88	34,32	45,76	57,2	68,64	80,08	91,52	102,96	114,4
M , Н·м	18,92	30,48	54,65	79,88	105,1	132,43	157,65	189,18	217,56	259,6
ω , рад/с	188,41	165,38	133,98	115,14	104,67	93,16	84,78	78,5	73,27	71,18

Природна механічна характеристика електродвигуна 4ПНМ180L04, побудована за даними таблиці 3, представлена на рисунку 7.

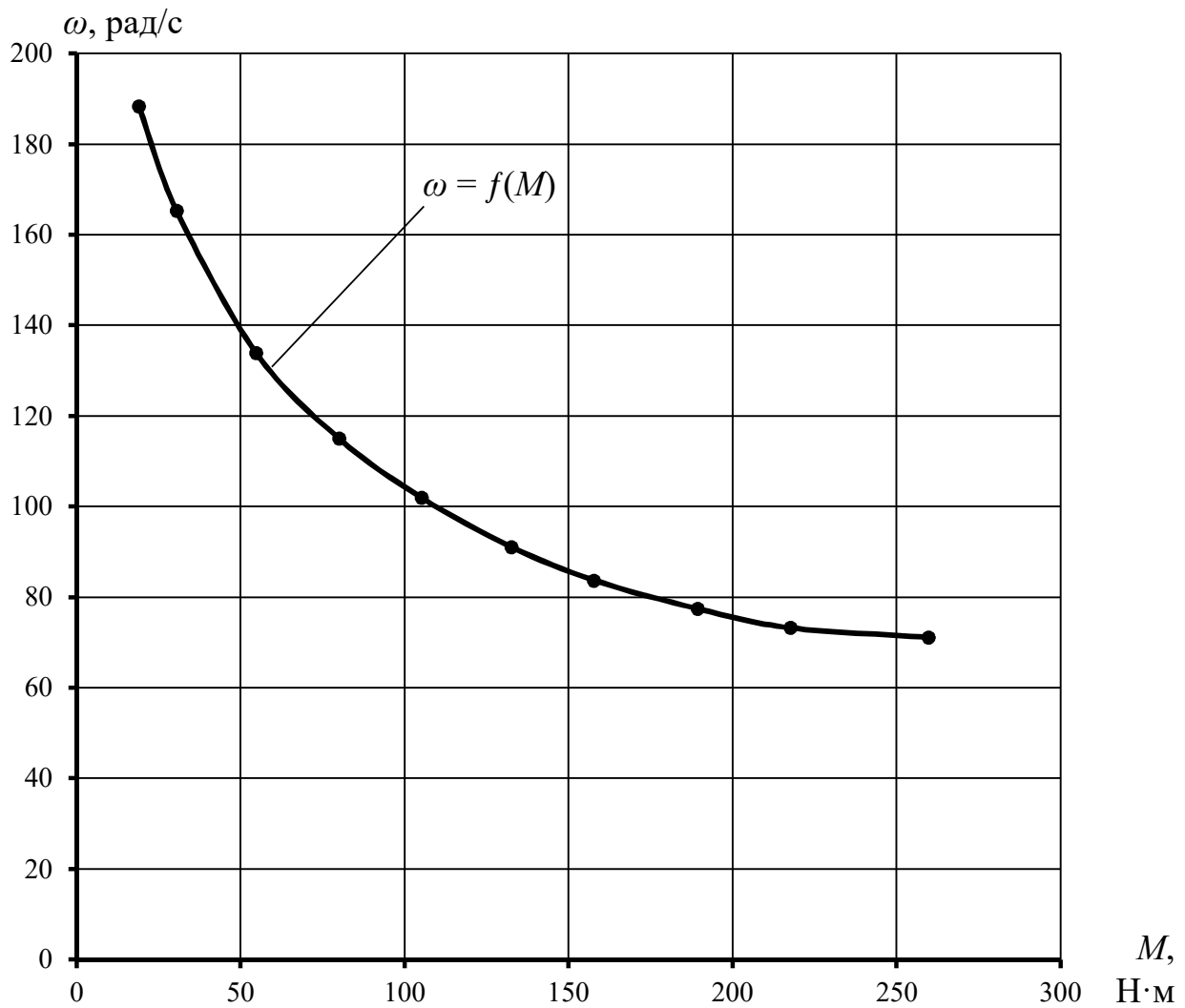


Рисунок 7 – Природна механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження 4ПНМ180L04

Для побудови штучних механічних характеристик визначаємо величину додаткового резистора, який необхідно ввести в коло якоря для забезпечення заданої частоти обертання електродвигуна за формулою

$$R_p = \left(1 - \frac{n_i}{n_n}\right) \cdot (R_n - R_{дв}),$$

де R_n – номінальний опір двигуна, Ом.

Номінальний опір двигуна визначаємо за формулою

$$R_n = \frac{U_n}{I_n};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{220}{57,2} = 3,85 \text{ Ом.}$$

Внутрішній опір двигуна знаходимо за виразом

$$R_{\text{дв}} = R_{\text{я}} + R_{\text{зб}},$$

де $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{зб}}$ – опір обмотки збудження, Ом.

Опір обмотки якоря розраховуємо за формулою

$$R_{\text{я}} \approx 0,75 \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ян}}},$$

де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна, в.о.

Визначаємо коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{ян}}};$$

$$\eta_{\text{н}} = \frac{11 \cdot 10^3}{220 \cdot 57,2} = 0,874;$$

$$R_{\text{я}} \approx 0,75 \cdot (1 - 0,874) \cdot \frac{220}{57,2} = 0,36 \text{ Ом.}$$

Опір послідовної обмотки збудження приблизно дорівнює

$$R_{\text{зб}} \approx 0,5 \cdot R_{\text{я}};$$

$$R_{\text{зб}} \approx 0,5 \cdot 0,36 = 0,18 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{дв}} = 0,36 + 0,18 = 0,54 \text{ Ом.}$$

Опір додаткового резистора в колі якоря, який необхідно ввести для зниження частоти обертання до 700 об/хв. Дорівнює

$$R_{\text{р1}} = \left(1 - \frac{700}{1000}\right) \cdot (3,85 - 0,54) = 0,99 \text{ Ом.}$$

Опір додаткового резистора в колі якоря, який необхідно ввести для зниження частоти обертання до 400 об/хв. дорівнює

$$R_{p2} = \left(1 - \frac{400}{1000}\right) \cdot (3,85 - 0,54) = 1,99 \text{ Ом.}$$

Для знайдених значень опорів резисторів розраховуємо і будуємо реостатні механічні характеристики ДПС ПЗ типу 4ПНМ180LO4.

Для частоти обертання двигуна $n_1 = 700$ об/хв.

$$\omega_{n1} = \frac{3,14 \cdot 700}{30} = 73,3 \text{ рад/с.}$$

Для частоти обертання двигуна $n_2 = 400$ об/хв.

$$\omega_{n2} = \frac{3,14 \cdot 400}{30} = 41,9 \text{ рад/с.}$$

Розрахункові значення для побудови реостатних механічних характеристик ДПС послідовного збудження при нових частотах обертання $n_1 = 700$ об/хв. та $n_2 = 400$ об/хв. зводимо до таблиці 4. Реостатні характеристики представлені на рисунку 8.

Таблиця 4 – Розрахункові значення для побудови реостатних механічних характеристик ДПС ПЗ

M , Н·м	18,92	30,48	54,65	79,88	105,1	132,43	157,65	189,18	217,56	259,6
ω^* , в.о.	1,8	1,58	1,28	1,1	1,0	0,89	0,81	0,75	0,7	0,68
ω_1 , рад/с	131,9	115,8	93,8	80,6	73,3	65,2	59,4	55,0	51,3	49,8
ω_2 , рад/с	75,4	66,2	53,6	46,1	41,9	37,3	33,9	31,4	29,3	28,5

Для розрахунку величини опорів резисторів для пуску ДПС ПЗ за даними таблиці 3 будуємо природну електромеханічну характеристику електродвигуна 4ПНМ180LO4 (рисунок 9) і відмічаємо на ній точки допустимих струмів I_1 та I_2 при перемиканні з однієї ступені резистора на іншу.

При цьому приймаємо

$$I_1 = (1,8 \dots 2,5) \cdot I_H;$$

$$I_1 = 1,8 \cdot 57,2 = 103 \text{ А};$$

$$I_2 = (1,2 \dots 1,5) \cdot I_H;$$

$$I_2 = 1,31 \cdot 57,2 = 74,9 \text{ А.}$$

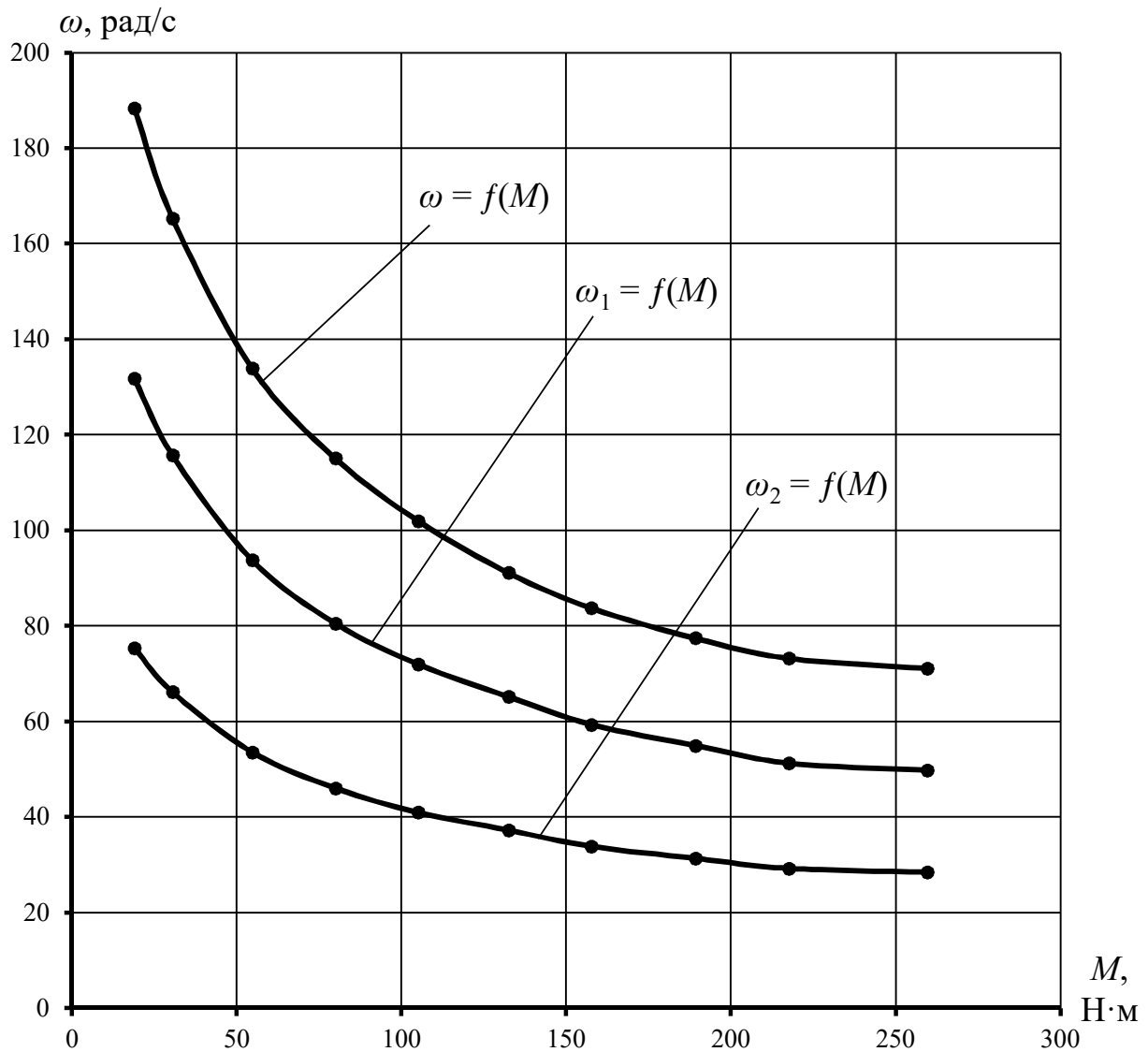


Рисунок 8 – Природна та реостатні механічні характеристики ДПС послідовного збудження 4ПНМ180L04

Приймаємо масштаб опору рівним $m_R = 0,03 \text{ Ом/мм}$.

Визначаємо довжину відрізка OK

$$OK = \frac{R_{дв}}{m_R};$$

$$OK = \frac{0,54}{0,03} = 18 \text{ мм.}$$

Знаходимо величини опорів резисторів

$$R_1 = \frac{U}{I_1};$$

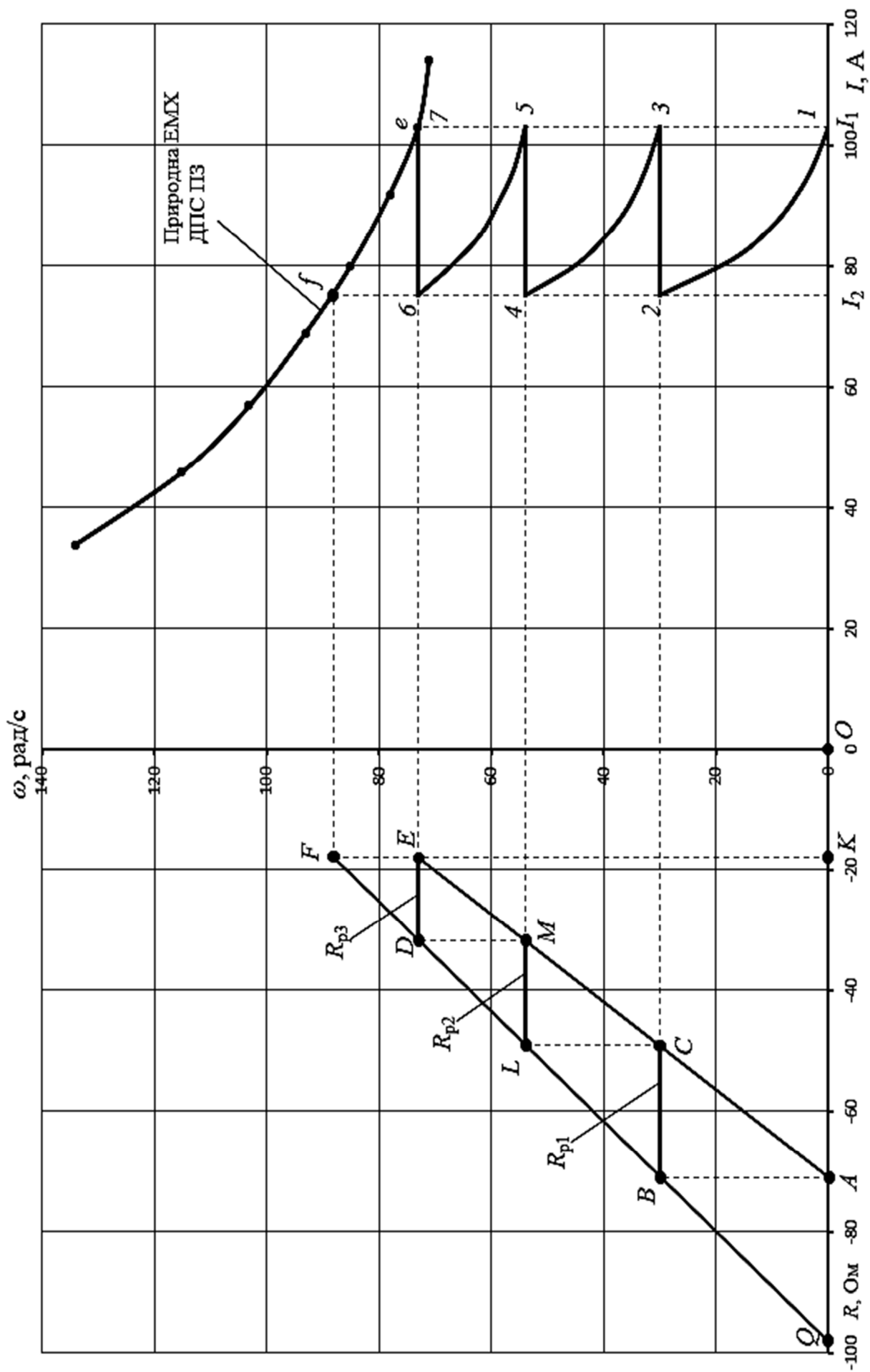


Рисунок 9 – Пускова діаграма двигуна постійного струму послідовного збудження з пуском в три ступені

$$R_1 = \frac{220}{103} = 2,14 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{U}{I_2};$$

$$R_2 = \frac{220}{74,9} = 2,94 \text{ Ом}.$$

Визначаємо довжину відрізків OA та OQ , враховуючи вибраний масштаб опору

$$OA = \frac{R_1}{m_R};$$

$$OA = \frac{2,14}{0,03} = 71,3 \text{ мм};$$

$$OQ = \frac{R_2}{m_R};$$

$$OQ = \frac{2,94}{0,03} = 98 \text{ мм}.$$

Перша ступень опору пускового резистора дорівнює

$$R_{p1} = m_R \cdot l_{BC};$$

$$R_{p1} = 0,03 \cdot 21 = 0,63 \text{ Ом}.$$

Друга ступень опору пускового резистора дорівнює

$$R_{p2} = m_R \cdot l_{LM};$$

$$R_{p2} = 0,03 \cdot 17 = 0,51 \text{ Ом}.$$

Третя ступень опору пускового резистора дорівнює

$$R_{p3} = m_R \cdot l_{DE};$$

$$R_{p3} = 0,03 \cdot 15 = 0,45 \text{ Ом.}$$

Повний опір резисторів пускового реостата дорівнює

$$R_p = R_{p1} + R_{p2} + R_{p3};$$

$$R_p = 0,63 + 0,51 + 0,45 = 1,59 \text{ Ом.}$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули.
- 3 Схему пуску двигуна постійного струму послідовного збудження з кількістю ступеней пускового реостата згідно варіанта індивідуального завдання.
- 4 Природну механічну характеристику ДПС послідовного збудження та штучні механічні характеристики, побудовані при різних частотах обертання двигуна.
- 5 Пускову діаграму ДПС послідовного збудження.
- 6 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Що називається електромеханічною характеристикою двигуна постійного струму?
- 2 Що називається механічною характеристикою двигуна постійного струму?
- 3 Що називається природною та штучною характеристиками двигуна постійного струму?
- 4 Які технічні дані двигуна постійного струму наводяться в його паспортних даних?
- 5 Поясніть порядок побудови природних механічної та електромеханічної характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) з використанням універсальних характеристик.
- 6 Що представляють собою універсальні механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження?
- 7 Чому механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження криволінійні?
- 8 Чи можна отримати в двигуні постійного струму послідовного збудження режим генераторного рекуперативного гальмування?
- 9 Як визначити номінальний опір двигуна за його паспортними даними?
- 10 Як визначити внутрішній опір двигуна?
- 11 Як приблизно визначити величину опору внутрішнього кола якоря

двигуна постійного струму послідовного збудження за каталожними даними?

12 Як за каталожними даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?

13 Як за каталожними даними визначити номінальний момент на валу електродвигуна?

14 З якою метою при пуску ДПС послідовного збудження в коло якоря вводять пусковий реостат?

15 Наведіть принципову схему вмикання двигуна постійного струму послідовного збудження.

16 Який вигляд мають природні електромеханічна і механічна характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження?

17 Як зміняться швидкість обертання двигуна постійного струму послідовного збудження та жорсткість механічних характеристик із збільшенням величини додаткового опору в якірному колі?

18 Як визначити додатковий опір в колі якоря двигуна постійного струму послідовного збудження за відомих координат хоча б однієї точки штучної і природної електромеханічної характеристики?

19 За яких обставин двигун постійного струму послідовного збудження «іде в разнос»?

20 Як побудувати пускову діаграму двигуна постійного струму послідовного збудження при додаткових опорах у колі якоря?

21 Як розрахувати опори пускового реостата двигуна постійного струму послідовного збудження графічним способом?

22 Як визначити коефіцієнт корисної дії електродвигуна при номінальному навантаженні?

23 Наведіть рівняння штучної реостатної електромеханічної характеристики.

24 Чому двигун постійного струму послідовного збудження не можна включати в мережу без навантаження на валу?

25 Який вигляд мають природні механічна та електромеханічна характеристики ДПС послідовного збудження?

25 Як впливає зміна додаткового опору в колі якоря на вид механічної та електромеханічної характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ОПОРІВ ПУСКОВИХ РЕЗИСТОРІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик (МХ) і опорів пускових резисторів асинхронного електродвигуна з фазним ротором (АД ФР) з використанням каталожних даних; навчитися будувати природну механічну характеристику та пускову діаграму асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором з використанням каталожних даних [1, с. 87-94; 2, с. 42-44; 3, с. 74-82; 19].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: методика побудови пускової діаграми та розрахунок опору пускових резисторів асинхронного електродвигуна (АД) з фазним ротором [1, с. 98-101; 2, с. 47-49; 19].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати природну механічну характеристику $\omega = f(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором.

2.2 Розрахувати і побудувати пускову діаграму АД з фазним ротором.

2.3 Визначити опір пускових резисторів АД з фазним ротором.

3 Загальні відомості і рекомендації

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені в сільському господарстві прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором. В окремих випадках використовують трифазні АД з фазним ротором, синхронні, однофазні АД з короткозамкненим ротором, універсальні колекторні двигуни та інші.

Асинхронні електродвигуни з фазним ротором складніші за конструкцією, дорожчі і менш надійні в експлуатації, ніж короткозамкнені, але завдяки можливості змінювати в них опір кола ротора можна регулювати параметри їх механічних характеристик.

Трифазні асинхронні електродвигуни з фазним ротором застосовують там, де необхідно регулювати частоту обертання в невеликих діапазонах, обмежувати пусковий струм або змінювати початковий пусковий момент. Для цього в коло ротора вмикають регульовальний опір.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Номер варіанту	Тип електродвигуна	P_H , кВт	n_H , об/хв.	R'_2 , Ом	$\cos\varphi_H$, в.о.	η_H , %	μ_K	E_{2K} , В	Кількість ступеней
1	4AK160S4Y3	11,0	1434	0,499	0,86	86,5	3,0	305	2
2	4AK160M4Y3	14,0	1445	0,334	0,87	88,5	3,5	300	2
3	4AK180M4Y3	18,5	1457	0,208	0,88	89,0	4,0	295	2
4	4AK200M4Y3	22,0	1463	0,134	0,87	90,0	4,0	340	2
5	4AK200L4Y3	30,0	1463	0,114	0,87	90,5	4,0	350	2
6	4AK225M4Y3	37,0	1448	0,083	0,87	90,0	3,0	160	4
7	4AK250SA4Y3	45,0	1455	0,078	0,88	91,5	3,0	230	4
8	4AK250SB4Y3	55,0	1465	0,054	0,90	90,5	3,0	200	4
9	4AK250M4Y3	71,0	1463	0,034	0,86	91,5	3,0	250	3
10	4AK160M6Y3	10,0	957	0,539	0,76	84,5	3,8	310	2
11	4AK180M6Y3	13,0	956	0,434	0,80	85,5	4,0	325	2
12	4AK200M6Y3	18,5	965	0,212	0,81	88,0	3,5	360	3
13	4AK200L6Y3	22,0	965	0,19	0,80	88,0	3,5	330	3
14	4AK225M6Y3	30,0	965	0,109	0,85	89,0	2,5	140	4
15	4AK250S6Y3	37,0	965	0,07	0,84	89,0	2,5	150	4
16	4AK250M6Y3	45,0	975	0,06	0,87	90,5	2,5	180	4
17	4AK160S8Y3	5,5	702	1,384	0,70	80,0	2,5	300	3
18	4AK160M8Y3	7,1	709	0,924	0,70	82,0	3,0	290	2
19	4AK180M8Y3	11,0	717	0,502	0,72	85,5	3,5	270	2
20	4AK200M8Y3	15,0	724	0,279	0,70	86,0	3,0	360	3
21	4AK200L8Y3	18,5	724	0,226	0,73	86,0	3,0	300	4
22	4AK225M8Y3	22,0	716	0,202	0,82	87,0	2,2	102	4
23	4AK250S8Y3	30,0	720	0,118	0,81	88,5	2,2	125	4
24	4AK250M8Y3	37,0	724	0,086	0,80	89,0	2,2	148	3
25	4АНК160М4У3	17,0	1439	0,306	0,87	88,0	3,5	315	2

Схема пуску трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором в дві ступені зображена на рисунку 1.

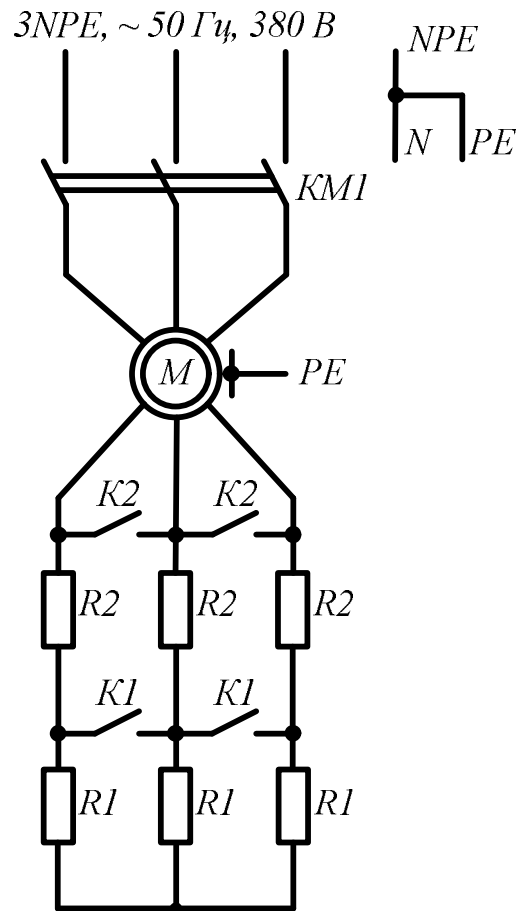


Рисунок 1 – Схема пуску АД з фазним ротором в дві ступені

Механічною характеристикою електродвигуна обертового руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M_{\text{дв}})$.

Механічну характеристику електродвигуна при номінальній напрузі живлення розраховують на основі формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}}, \quad (1)$$

приймаючи $a \approx 1$, де

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

де R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R'_2 – активний опір фази обмотки ротора, зведений до обмотки статора, Ом,

отримаємо

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

де M_k – максимальний (критичний) момент електродвигуна, Н·м;

S_k – критичне ковзання двигуна, яке відповідає максимальному оберտальному моменту, в.о.;

S_i – поточне значення ковзання, в.о.

Максимальний (критичний) момент електродвигуна, M_k , Н·м, визначається за формулою

$$M_k = M_n \cdot \mu_k, \quad (3)$$

де M_n – номінальний момент електродвигуна, Н·м;

μ_k – кратність максимального (критичного) моменту двигуна, в.о.

Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (4)$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_n – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

Номінальна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}, \quad (5)$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Критичне ковзання визначається за формулою

$$S_k = S_n \cdot \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2 \cdot S_n \cdot (\mu_k - 1)}}{1 - 2 \cdot S_n \cdot (\mu_k - 1)}, \quad (6)$$

де S_n – номінальне ковзання АД, в.о.

Номінальне ковзання АД визначається за формулою

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}, \quad (7)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.

Синхронна частота обертання n_0 , об/хв., визначається за формулою

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (8)$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;
 p – кількість пар полюсів.

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - S_k). \quad (9)$$

Перехід від ковзання S до кутової швидкості виконується за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i), \quad (10)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}. \quad (11)$$

Дані розрахунку механічної характеристики АД з фазним ротором $\omega = f(M_{дв})$ зручно звести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані розрахунку механічної характеристики АД

S , в.о.	0			S_H			S_K		
ω , рад/с	ω_0			ω_H			ω_K		
M , Н·м	0			M_H			M_K		

В прямокутній системі координат за даними таблиці 2 будують природну механічну характеристику АД з фазним ротором (рисунок 2).

Розрахунок опорів резисторів для пуску електродвигуна виконується графоаналітичним методом. Для цього задаються значення моментів: M_1 – початковий пусковий момент і M_2 – момент перемикавання

$$M_1 = (0,7 \dots 0,85) \cdot M_K; \quad (12)$$

$$M_2 = (1,1 \dots 1,5) \cdot M_H. \quad (13)$$

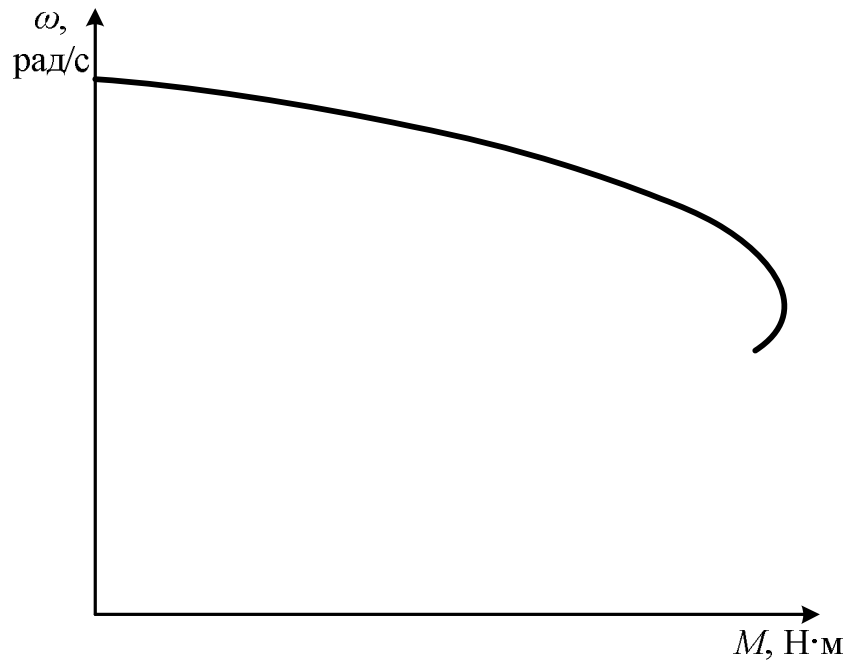


Рисунок 2 – Природна механічна характеристика АД з фазним ротором

Через визначені значення моментів M_1 і M_2 проводять прямі, паралельні осі ординат, точки їх перетину з механічною характеристикою асинхронного електродвигуна з фазним ротором позначають точками a і b (рисунок 3).

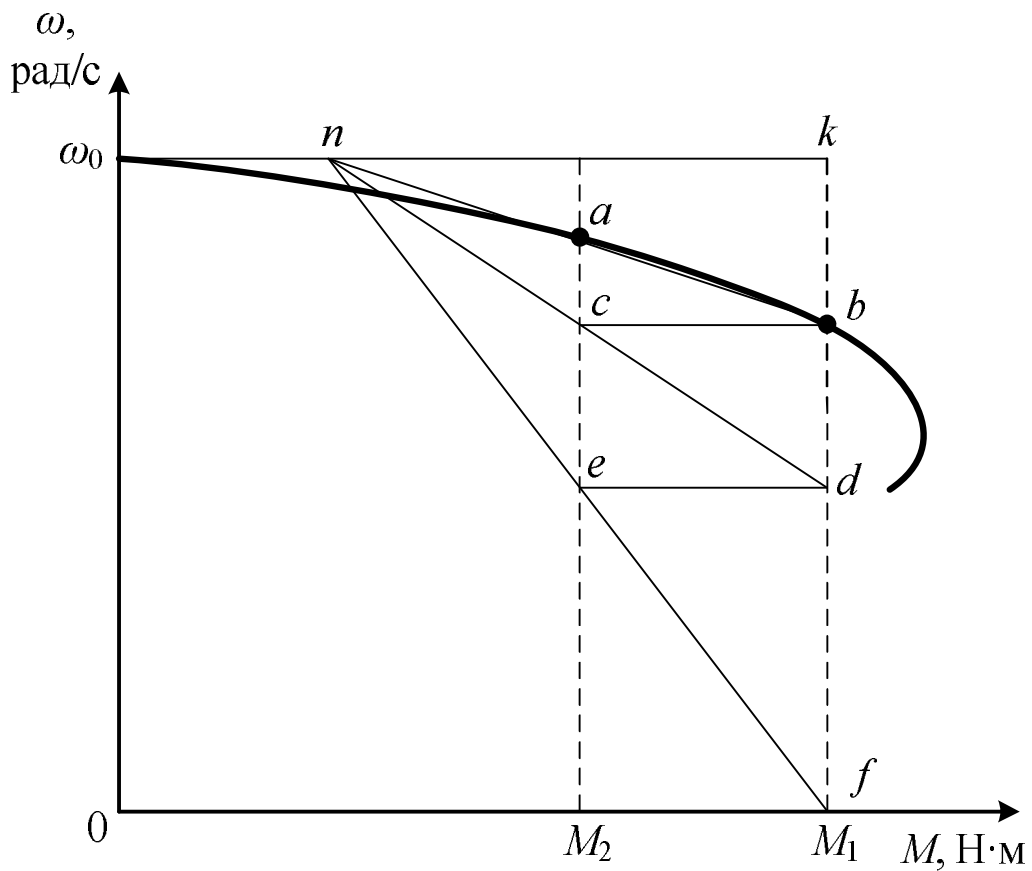


Рисунок 3 – Пускова діаграма АД з фазним ротором в дві ступені

Через точку ω_0 проводять пряму, паралельну осі абсцис. Через точки a і b проводять пряму до перетину з горизонталлю в точці n – полюсом побудови реостатних механічних характеристик, за якими відбувається процес пуску на ступенях пускового реостата. Через точки n і f проводять пряму. Точку перетину прямої nf з прямою, проведеною з M_2 позначають точкою e . Потім через точку e проводять лінію, паралельну осі абсцис, до перетину з прямою fk , проведеною з M_1 та отримують точку d . Аналогічно будують лінії dn і cb . Побудова вважається закінченою, якщо при заданій кількості ступенів пускового резистора (в конкретному випадку 2 ступені) при шунтуванні останньої ступені пускового реостата момент АД збільшується до значення M_1 на природній механічній характеристиці.

4 Приклад розрахунку

Для асинхронного електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3 розрахувати і побудувати природну механічну характеристику.

Каталожні дані АД з фазним ротором:

$$P_H = 7,5 \text{ кВт}; \quad E_{2к} = 300 \text{ В}; \quad \mu_k = 3,5; \quad n_H = 950 \text{ об/хв.};$$

$$R'_2 = 1,18 \text{ Ом}; \quad \eta_H = 82,5 \%; \quad \cos\varphi_H = 0,77.$$

Побудувати пускову діаграму електродвигуна і розрахувати значення опорів пускових резисторів. Пуск АД повинен бути виконаний в 2 ступені.

Схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором в дві ступені представлена на рисунку 4.

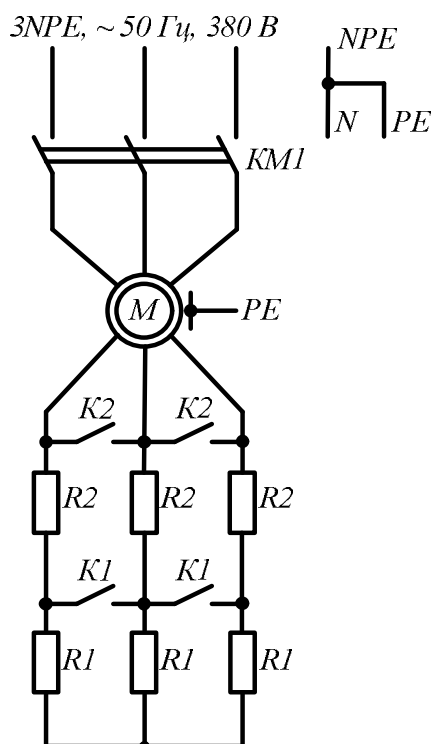


Рисунок 4 – Схема пуску АД з фазним ротором в 2 ступені

Розрахунок механічної характеристики асинхронного двигуна проводимо на основі уточненої формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S_i}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S_i} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}},$$

де $M_{\text{к}}$ – критичний (максимальний) момент, який розвиває двигун, Н·м;

$a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до активного опору фази обмотки ротора, зведеного до обмотки статора, в.о.
Приймаємо $a \approx 1$;

S_i – поточне ковзання, в.о.;

$S_{\text{к}}$ – критичне значення ковзання, в.о., яке відповідає максимальному обертовальному моменту, в.о.

Максимальний (критичний) момент електродвигуна, $M_{\text{к}}$, Н·м, визначаємо за формулою

$$M_{\text{к}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{к}},$$

де $M_{\text{н}}$ – номінальний момент електродвигуна, Н·м;

$\mu_{\text{к}}$ – кратність максимального моменту двигуна, в.о.

Номінальний момент визначаємо за формулою

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт.

$\omega_{\text{н}}$ – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

Номінальну кутову швидкість визначаємо за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30},$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3,14 \cdot 950}{30} = 99,4 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{н}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{99,4} = 75,45 \text{ Н·м};$$

$$M_k = 75,45 \cdot 3,5 = 264,08 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критичне ковзання визначаємо за формулою

$$S_k = S_H \cdot \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2 \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)},$$

де S_H – номінальне ковзання АД, в.о.

Номінальне ковзання АД визначаємо за формулою

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0},$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

n_H – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Синхронну частоту обертання n_0 , об/хв., визначаємо за формулою

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для електродвигуна з фазним ротором типу 4АК160S6У3 $p = 3$. Тоді

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$S_H = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05;$$

$$S_k = 0,05 \cdot \frac{3,5 + \sqrt{3,5^2 - 1 + 2 \cdot 0,05 \cdot (3,5 - 1)}}{1 - 2 \cdot 0,05 \cdot (3,5 - 1)} = 0,45.$$

Критичну кутову швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначаємо за формулою

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - S_k),$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$\omega_k = 104,67 \cdot (1 - 0,45) = 57,6 \text{ рад/с}.$$

Перехід від ковзання S до кутової швидкості виконуємо за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i).$$

Дані розрахунку механічної характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором $\omega = f(M_{\text{дв}})$ зводимо до таблиці 3.

Таблиця 3 – Дані розрахунку механічної характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

S , в.о.	0	0,02	0,04	$S_{\text{н}}$ 0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	$S_{\text{к}}$ 0,45	0,5	0,6
ω , рад/с	ω_0 104,67	102,6	100,5	$\omega_{\text{н}}$ 99,4	97,3	94,2	83,7	73,3	62,8	$\omega_{\text{к}}$ 57,6	52,3	41,9
M , Н·м	0	32,7	62,57	$M_{\text{н}}$ 75,45	102,3	136,1	213,1	249,7	262,8	$M_{\text{к}}$ 264,08	263,1	256,7

В прямокутній системі координат за даними таблиці 3 будуємо природну механічну характеристику АД з фазним ротором (рисунок 5).

Для побудови пускової діаграми електродвигуна 4AK160S6У3 задаємо значення моментів: початкового пускового моменту M_1 і моменту перемикання M_2

$$M_1 = (0,7 \dots 0,85) \cdot M_{\text{к}};$$

$$M_1 = 0,7 \cdot 264,08 = 184,9 \text{ Н·м};$$

$$M_2 = (1,1 \dots 1,5) \cdot M_{\text{н}};$$

$$M_2 = 1,29 \cdot 75,45 = 97,3 \text{ Н·м}.$$

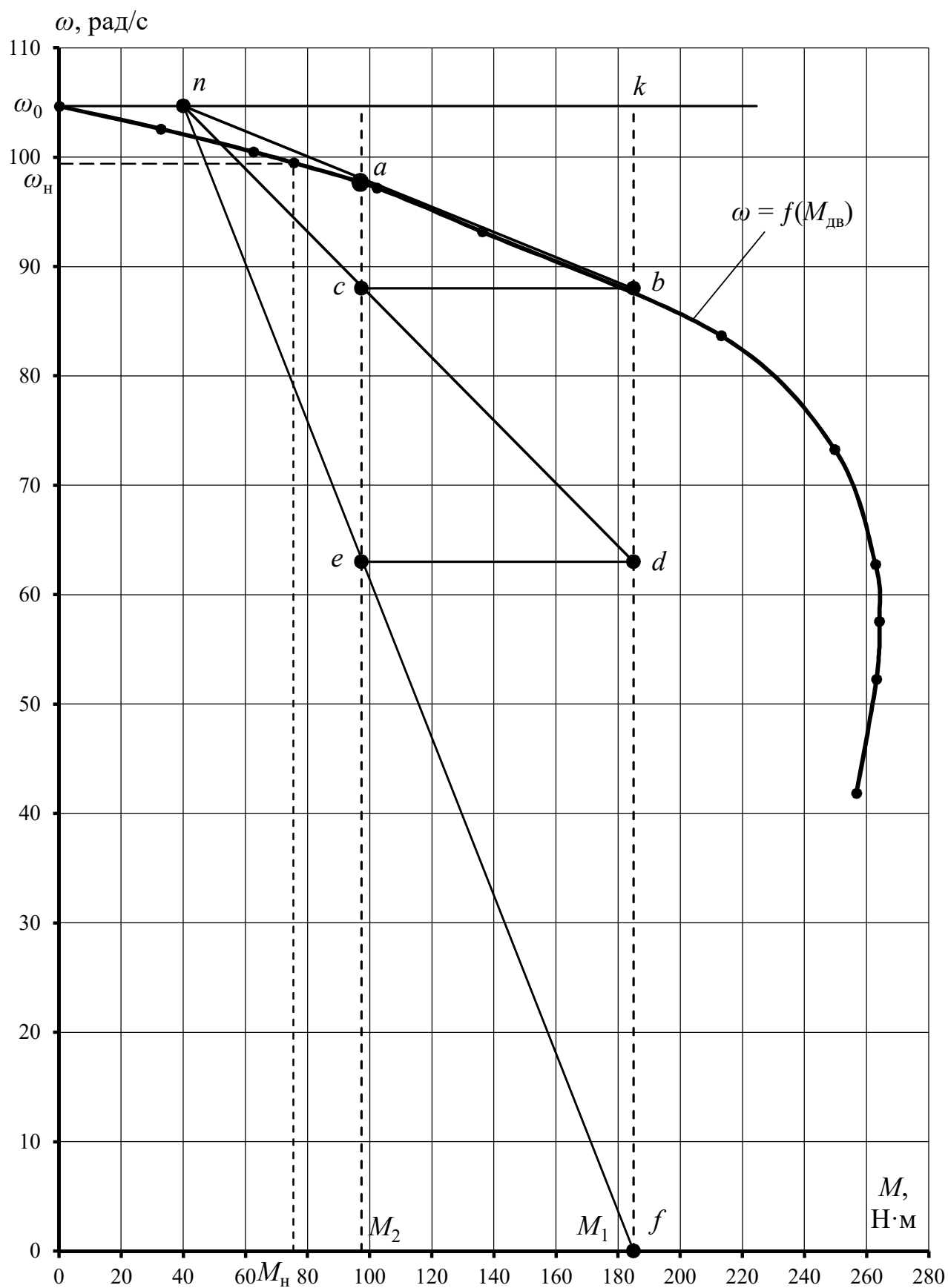


Рисунок 5 – Природна механічна характеристика та пускова діаграма АД з фазним ротором серії 4АК160S6У3 в дві ступені

Визначаємо значення опору обмотки ротора R_2 , оскільки в каталожних даних задається значення активного опору фази обмотки ротора R'_2 , зведене до обмотки статора за формулою

$$R_2 = R'_2 \cdot \left(\frac{E_{2к}}{U_H} \right)^2;$$

$$R_2 = 1,18 \cdot \left(\frac{300}{380} \right)^2 = 0,74 \text{ Ом.}$$

Визначаємо масштаб опору

$$m_R = \frac{R_2}{l_{bk}};$$

$$m_R = \frac{0,74}{17} = 0,044 \text{ Ом/мм.}$$

Визначаємо значення опорів пускових резисторів – перша ступень реостата дорівнює

$$R_{п1} = l_{fd} \cdot m_R;$$

$$R_{п1} = 63 \cdot 0,044 = 2,77 \text{ Ом};$$

– друга ступень реостата дорівнює

$$R_{п2} = l_{db} \cdot m_R;$$

$$R_{п2} = 25 \cdot 0,044 = 1,1 \text{ Ом.}$$

Повний опір пускового реостата дорівнює

$$R_p = R_{п1} + R_{п2};$$

$$R_p = 2,77 + 1,1 = 3,87 \text{ Ом.}$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули.
- 3 Схему пуску асинхронного електродвигуна з фазним ротором з кількістю ступенів пускового реостата згідно індивідуального завдання.
- 4 Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
- 5 Пускову діаграму асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
- 6 Розрахункові дані опорів пускових резисторів.
- 7 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Які технічні дані асинхронного електродвигуна (АД) з фазним ротором даються в каталожних даних?
- 2 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 3 Що називається природною та штучною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 4 Як визначається синхронна частота обертання АД?
- 5 Як визначається синхронна кутова швидкість АД?
- 6 Як за каталожними даними визначити номінальний момент на валу АД?
- 7 Як за каталожними даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?
- 8 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна? Як воно пов'язане зі швидкістю ротора і як його визначити?
- 9 Що таке критичне ковзання асинхронного двигуна і від чого воно залежить?
- 10 Що таке максимальний момент та яким чином його можна розрахувати за каталожними даними електродвигуна?
- 11 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні АД?
- 12 Як розраховувати поточне значення моменту для побудови механічної характеристики АД?
- 13 Який вигляд має природна механічна характеристика АД з фазним ротором?
- 14 Яка методика розрахунку пускових резисторів асинхронного електродвигуна з фазним ротором?
- 15 За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик (МХ) трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (АД КЗР) з використанням каталожних даних.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором з використанням каталожних даних [1, с. 79-91; 2, с. 38-44; 3, с. 74-82; 17].

1.2 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Розрахувати і побудувати механічну характеристику трифазного АД з короткозамкненим ротором $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ при номінальній напрузі живлення з використанням каталожних даних.

2.2 Розрахувати і побудувати механічну характеристику трифазного АД з короткозамкненим ротором $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ при зниженій напрузі мережі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги, згідно варіанта індивідуального завдання.

3 Загальні відомості і рекомендації

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені в сільському господарстві прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором. В окремих випадках використовують трифазні АД з фазним ротором, синхронні, однофазні АД з короткозамкненим ротором, універсальні колекторні двигуни та інші.

Механічною характеристикою електродвигуна обертового руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M_{\text{дв}})$ (рисунок 1).

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна розраховується за уточненою формулою Клосса з її інтерполяцією в пусковій частині відносно мінімального і пускового моментів двигуна, розрахованих через каталожні кратності цих моментів

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}}, \quad (1)$$

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електро-двигуна	P_n , кВт	n_n , об/хв.	I_n , А	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	K_i	$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{мін}}$	$\mu_{\text{к}}$	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²	K_U , в.о.
1	АИР80А2У3	1,5	2850	3,31	81	0,85	7,0	2,1	1,6	2,2	0,0018	0,75
2	АИР80В2У3	2,2	2850	4,63	83	0,87	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0021	0,8
3	АИР71А2У3	0,75	2820	1,75	78,5	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	0,00097	0,85
4	АИР71В2У3	1,1	2800	2,55	79	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	0,0011	0,78
5	АИР90L2У3	3,0	2850	6,13	84,5	0,88	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0035	0,87
6	АИР100S2У3	4,0	2850	7,94	87	0,88	7,5	2,0	1,6	2,2	0,0059	0,88
7	АИР100L2У3	5,5	2850	10,7	88	0,89	7,5	2,0	1,6	2,2	0,0075	0,76
8	АИР160M2У3	18,5	2910	34,5	90,5	0,9	7,0	2,0	1,8	2,7	0,043	0,85
9	АИР132M2У3	11,0	2910	21,1	88	0,90	7,5	1,6	1,2	2,2	0,023	0,86
10	АИР160S2У3	15,0	2910	28,5	90	0,89	7,0	1,8	1,7	2,7	0,039	0,77
11	АИР80А4У3	1,1	1395	2,75	75	0,81	5,5	2,2	1,6	2,2	0,0032	0,9
12	АИР80В4У3	1,5	1395	3,52	78	0,83	5,5	2,2	1,6	2,2	0,0033	0,89
13	АИР90L4У3	2,2	1400	5,0	81	0,83	6,5	2,1	1,6	2,2	0,0056	0,75
14	АИР100S4У3	3,0	1410	6,7	82	0,83	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0087	0,87
15	АИР100L4У3	4,0	1410	8,5	85	0,84	7,0	2,0	1,6	2,2	0,011	0,81
16	АИР112M4У3	5,5	1430	11,4	85,5	0,86	7,0	2,0	1,6	2,2	0,017	0,79
17	АИР160S4У3	15,0	1455	28,5	90	0,89	7,0	1,9	1,8	2,9	0,078	0,9
18	АИР160M4У3	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	7,0	1,9	1,8	2,9	0,100	0,88
19	АИР160S6У3	11,0	970	22,9	88	0,83	6,5	2,0	1,6	2,7	0,120	0,78
20	АИР160M6У3	15,0	970	30,1	88	0,85	6,5	2,0	1,6	2,7	0,150	0,75
21	АИР80В6У3	1,1	920	3,05	74	0,74	4,5	2,0	1,6	2,2	0,0046	0,82
22	АИР90L6У3	1,5	925	4,2	76	0,72	6,0	2,0	1,6	2,2	0,0073	0,89
23	АИР100L6У3	2,2	945	5,6	81	0,74	6,0	2,0	1,6	2,2	0,013	0,9
24	АИР112МА6У3	3,0	950	7,1	81,5	0,75	6,0	2,0	1,6	2,2	0,017	0,77
25	АИР112МВ6У3	4,0	950	9,2	82	0,81	6,0	2,0	1,6	2,2	0,021	0,87

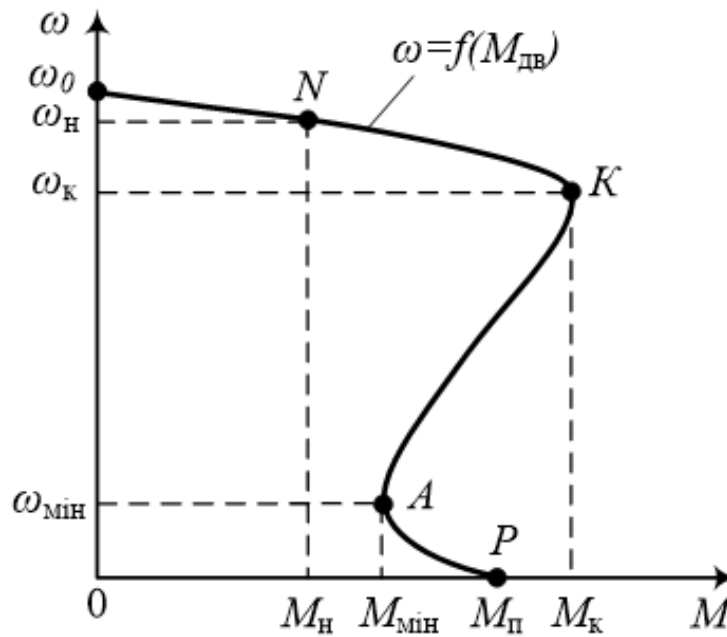


Рисунок 1 – Механічна характеристика трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором $\omega = f(M_{дв})$

де M_K – критичний (максимальний) момент, який розвиває електродвигун, Н·м;

$a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до активного опору фази обмотки ротора, зведеного до обмотки статора, в.о.;

S – поточне ковзання, в.о.;

S_K – критичне значення ковзання, в.о.

Враховуючи, що $R_1 \approx R'_2$, рівняння (1) прийме вигляд

$$M = \frac{2M_K \cdot (1 + S_K)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2S_K}. \quad (2)$$

Рівняння механічної характеристики (1) відповідає більш-менш точним співвідношенням параметрів характеристики, тому що враховує падіння напруги на активному опорі статора R_1 . В реальних умовах активний опір статора (особливо для АД середньої та великої потужностей) незначний і ним (з достатньою для практичних розрахунків точністю) можна знехтувати

$$R_1 = 0. \quad (3)$$

З урахуванням (3) рівняння механічної характеристики (1) буде мати вигляд

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S}}. \quad (4)$$

Рівняння (4) називається *спрощеною механічною характеристикою* АД в координатах S та M . Однак для двигунів великої потужності (де R_1 дуже мале) це рівняння досить точно відповідає фізичним процесам АД.

Якщо не вимагається висока точність, то механічну характеристику АД з короткозамкненим ротором в режимі двигуна можна побудувати за координатами п'яти характерних точок (рисунок 1):

1 точка ідеального холостого ходу (синхронний режим) (точка ω_0) з координатами $\omega = \omega_0$, $(S = 0)$, $M_{\text{дв}} = 0$;

2 точка номінального режиму (точка N) з координатами: $\omega = \omega_{\text{н}}$, $(S = S_{\text{н}})$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$;

3 точка максимального моменту (критичний режим) (точка K) з координатами $\omega = \omega_{\text{к}}$, $(S = S_{\text{к}})$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{к}} = M_{\text{макс}}$;

4 точка мінімального моменту (точка A) з координатами: $\omega = \omega_{\text{мін}}$, $(S = S_{\text{мін}} = 0,8 \dots 0,85)$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{мін}}$;

5 точка короткого замикання (режим початкового пуску) (точка P) з координатами: $\omega = 0$, $(S = 1)$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{п}}$.

Координати характерних точок механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором розраховуються за каталожними даними двигуна.

Перша точка – точка ідеального холостого ходу (синхронний режим): $\omega = \omega_0$, $(S = 0)$, $M_{\text{дв}} = 0$.

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (5)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (6)$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Друга точка – точка номінального режиму: $\omega = \omega_{\text{н}}$, $(S = S_{\text{н}})$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$.

Номінальна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_{\text{H}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{H}}}{30}, \quad (7)$$

де n_{H} – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}}, \quad (8)$$

де P_{H} – номінальна потужність двигуна, Вт.

Номінальне ковзання електродвигуна визначається за формулою

$$S_{\text{H}} = \frac{n_0 - n_{\text{H}}}{n_0}. \quad (9)$$

Третя точка – точка критичного моменту: $\omega = \omega_{\text{к}}$, $(S = S_{\text{к}})$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{к}}$.

Критичне ковзання визначається за формулою

$$S_{\text{к}} = S_{\text{H}} \cdot \frac{\mu_{\text{к}} + \sqrt{\mu_{\text{к}}^2 - 1 + 2 \cdot S_{\text{H}} \cdot (\mu_{\text{к}} - 1)}}{1 - 2 \cdot S_{\text{H}} \cdot (\mu_{\text{к}} - 1)}, \quad (10)$$

де $\mu_{\text{к}}$ – кратність максимального (критичного) моменту двигуна, в.о.

Кратність максимального моменту $\mu_{\text{к}} = M_{\text{к}} / M_{\text{H}}$ надається в каталожних даних і характеризує перевантажувальну здатність двигуна.

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{к}}). \quad (11)$$

Критичний (максимальний) момент визначається за формулою

$$M_{\text{к}} = M_{\text{H}} \cdot \mu_{\text{к}}. \quad (12)$$

Четверта точка – точка мінімального моменту: $\omega = \omega_{\text{мін}}$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{мін}}$, $(S = S_{\text{мін}} = 0,8 \dots 0,85)$.

Мінімальна кутова швидкість, яка відповідає мінімальному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_{\text{мін}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{мін}}). \quad (13)$$

Мінімальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{мін}} = M_{\text{H}} \cdot \mu_{\text{мін}}, \quad (14)$$

де $\mu_{\text{мін}}$ – кратність мінімального моменту двигуна, в.о.

П'ята точка – точка пускового моменту: $\omega = 0$, ($S = 1$), $M_{дв} = M_{п}$.

Пусковий момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{п} = M_{н} \cdot \mu_{п}, \quad (15)$$

де $\mu_{п}$ – кратність пускового моменту двигуна, в.о.

У короткозамкнених двигунів величина початкового пускового моменту практично не завжди є найменшим значенням моменту в двигунному режимі. При малих кутових швидкостях ($S_{мін} = 0,8 \dots 0,85$) механічна характеристика асинхронного електродвигуна має провал внаслідок впливу асинхронних моментів від вищих непарних гармонік в магнітному полі обмоток. Це необхідно враховувати при пуску двигуна під навантаженням.

Оскільки момент асинхронного електродвигуна змінюється пропорційно квадрату напруги, то розрахувати характерні точки штучної механічної характеристики електродвигуна з урахуванням коефіцієнта зниження напруги можна за формулами

$$M'_{к} = M_{н} \cdot \mu_{к} \cdot K_U^2; \quad (16)$$

$$M'_{мін} = M_{н} \cdot \mu_{мін} \cdot K_U^2; \quad (17)$$

$$M'_{п} = M_{н} \cdot \mu_{п} \cdot K_U^2, \quad (18)$$

де K_U – коефіцієнт, що враховує зниження напруги мережі, в.о.

$$K_U = \frac{U_{факт}}{U_{н}}, \quad (19)$$

де $U_{факт}$ – фактична напруга мережі, В;

$U_{н}$ – номінальна напруга мережі, В.

Інші обертальні моменти електродвигуна розраховуються на основі формули Клосса

$$M = \frac{2M_{к} \cdot (1 + a \cdot S_{к})}{\frac{S_i}{S_{к}} + \frac{S_{к}}{S_i} + 2 \cdot a \cdot S_{к}}.$$

Перехід від ковзання S до кутової швидкості ω для будь-якої точки механічної характеристики виконується за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i). \quad (4.20)$$

Момент асинхронного електродвигуна з урахуванням коефіцієнта зниження напруги для будь-якої точки механічної характеристики розраховується за формулою

$$M'_i = M_i \cdot K_U^2. \quad (4.21)$$

Дані розрахунків природної $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та штучної $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ механічних характеристик зручно звести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані розрахунку природної та штучної механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

S	0			$S_{\text{н}}$			$S_{\text{к}}$	$S_{\text{мін}}$	1,0
ω , рад/с	ω_0			$\omega_{\text{н}}$			$\omega_{\text{к}}$	$\omega_{\text{мін}}$	0
$M(U_{\text{н}})$, Н·м	0			$M_{\text{н}}$			$M_{\text{к}}$	$M_{\text{мін}}$	$M_{\text{п}}$
$M'(U_i)$, Н·м	0			$M'_{\text{н}}$			$M'_{\text{к}}$	$M'_{\text{мін}}$	$M'_{\text{п}}$

В прямокутній системі координат будують механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при номінальній напрузі $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та зниженій напрузі мережі $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ (рисунок 2).

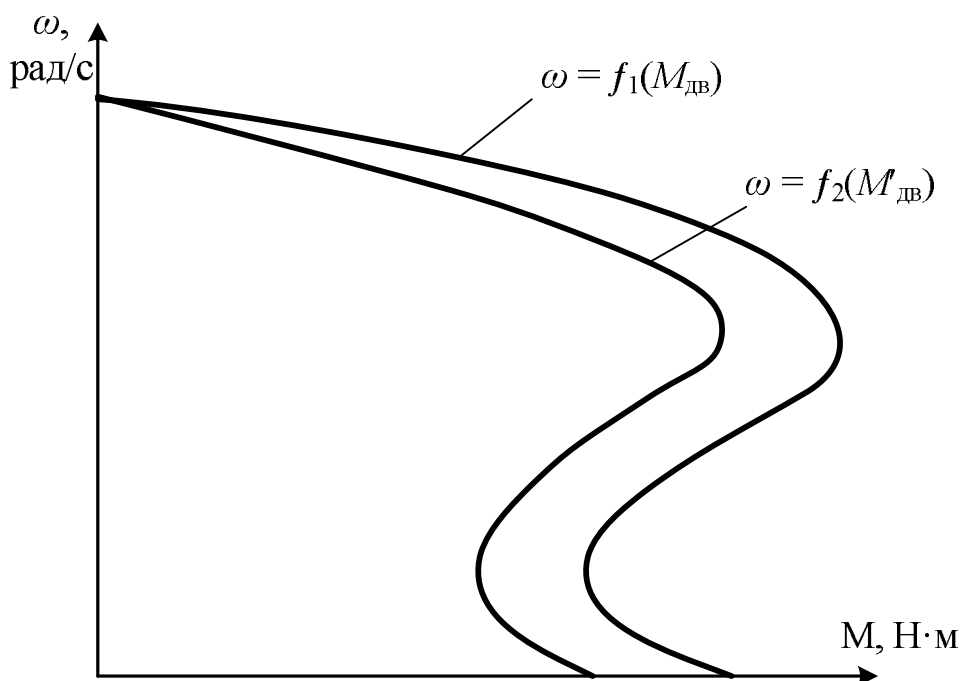


Рисунок 2 – Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній та зниженій напрузі мережі

4 Приклад розрахунку

Для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором типу 5А80МВ6 розрахувати і побудувати природну та штучну (при зниженій напрузі мережі) механічні характеристики.

Каталожні дані АД з короткозамкненим ротором:

$$\begin{array}{llll}
 P_{\text{H}} = 1,1 \text{ кВт}; & U_{\text{H}} = 380 \text{ В}; & I_{\text{H}} = 3,3 \text{ А}; & n_{\text{H}} = 930 \text{ об/хв.}; \\
 \eta_{\text{H}} = 72 \text{ \%}; & \cos\varphi_{\text{H}} = 0,7; & K_i = 4,5; & J_{\text{дв}} = 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \\
 \mu_{\text{п}} = 2,0; & \mu_{\text{мін}} = 1,6; & \mu_{\text{к}} = 2,4; & K_U = 0,9; \quad m = 16 \text{ кг.}
 \end{array}$$

Розрахунок механічної характеристики асинхронного двигуна проводимо на основі уточненої формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot S_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{к}}},$$

де $M_{\text{к}}$ – критичний (максимальний) момент, який розвиває двигун, Н·м;

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

– коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до активного опору фази обмотки ротора, зведеного до обмотки статора, в.о.

S – поточне ковзання, в.о.;

$S_{\text{к}}$ – критичне значення ковзання, в.о.

Для побудови природної механічної характеристики електродвигуна розраховуємо п'ять характерних точок.

Перша точка – точка ідеального холостого ходу (синхронний режим): $\omega = \omega_0$, ($S = 0$), $M_{\text{дв}} = 0$.

Визначаємо синхронну кутову швидкість

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для АД з короткозамкненим ротором типу 5А80МВ6 $p = 3$. Тоді

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Друга точка – точка номінального режиму: $\omega = \omega_H$, ($S = S_H$), $M_{дв} = M_H$.
Визначаємо номінальну кутову швидкість

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30},$$

де n_H – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 930}{30} = 97,3 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо номінальний момент електродвигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H},$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт.

$$M_H = \frac{1,1 \cdot 10^3}{97,3} = 11,31 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Визначаємо номінальне ковзання електродвигуна

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0};$$

$$S_H = \frac{1000 - 930}{1000} = 0,07.$$

Визначаємо номінальний момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі мережі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_H = M_H \cdot K_U^2;$$

$$M'_H = 11,31 \cdot 0,9^2 = 9,16 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Третя точка – точка критичного моменту: $\omega = \omega_K$, ($S = S_K$), $M_{дв} = M_K$.
Визначаємо критичне ковзання

$$S_K = S_H \cdot \frac{\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1 + 2 \cdot S_H \cdot (\mu_K - 1)}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot (\mu_K - 1)},$$

де μ_K – кратність максимального (критичного) моменту двигуна, в.о.

$$S_k = 0,07 \cdot \frac{2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1 + 2 \cdot 0,07 \cdot (2,4 - 1)}}{1 - 2 \cdot 0,07 \cdot (2,4 - 1)} = 0,4.$$

Визначаємо критичну кутову швидкість, яка відповідає критичному ковзанню

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - S_k);$$

$$\omega_k = 104,7 \cdot (1 - 0,4) = 62,82 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо критичний (максимальний) момент електродвигуна

$$M_k = M_H \cdot \mu_k;$$

$$M_k = 11,31 \cdot 2,4 = 27,14 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Визначаємо критичний момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_k = M_H \cdot \mu_k \cdot K_U^2 = M_k \cdot K_U^2;$$

$$M'_k = 11,31 \cdot 2,4 \cdot 0,9^2 = 27,14 \cdot 0,9^2 = 21,99 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Четверта точка – точка мінімального моменту: $\omega = \omega_{\text{мін}}$, $M_{\text{дв}} = M_{\text{мін}}$, ($S = S_{\text{мін}} = 0,8 \dots 0,85$).

Визначаємо мінімальну кутову швидкість, яка відповідає мінімальному ковзанню

$$\omega_{\text{мін}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{мін}});$$

$$\omega_{\text{мін}} = 104,7 \cdot (1 - 0,85) = 15,71 \text{ рад/с.}$$

Визначаємо мінімальний момент електродвигуна

$$M_{\text{мін}} = M_H \cdot \mu_{\text{мін}},$$

де $\mu_{\text{мін}}$ – кратність мінімального моменту двигуна, в.о.

$$M_{\text{мін}} = 11,31 \cdot 1,6 = 18,1 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Визначаємо мінімальний момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_{\text{мін}} = M_H \cdot \mu_{\text{мін}} \cdot K_U^2 = M_{\text{мін}} \cdot K_U^2;$$

$$M'_{\text{мін}} = 11,31 \cdot 1,6 \cdot 0,9^2 = 18,1 \cdot 0,9^2 = 14,66 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

П'ята точка – точка пускового моменту: $\omega = 0$, ($S = 1$), $M_{дв} = M_{п}$.

$$M_{п} = M_{н} \cdot \mu_{п},$$

де $\mu_{п}$ – кратність пускового моменту двигуна, в.о.

$$M_{п} = 11,31 \cdot 2,0 = 22,62 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо пусковий момент штучної механічної характеристики АД при зниженій напрузі з урахуванням коефіцієнта зниження напруги

$$M'_{п} = M_{н} \cdot \mu_{п} \cdot K_U^2 = M_{п} \cdot K_U^2;$$

$$M'_{п} = 11,31 \cdot 2,0 \cdot 0,9^2 = 22,62 \cdot 0,9^2 = 18,32 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахунок природної та штучної (при зниженій напрузі) механічних характеристик АД з короткозамкненим ротором зводимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Розрахункові дані природної та штучної механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

S , в.о.	0	$S_{н}$ 0,07	0,1	0,2	0,3	$S_{к}$ 0,4	0,6	$S_{мін}$ 0,85	1,0
ω , рад/с	ω_0 104,7	$\omega_{н}$ 97,3	94,23	83,76	73,29	$\omega_{к}$ 62,82	41,88	$\omega_{мін}$ 15,71	0
$M(U_{н})$, Н·м	0	$M_{н}$ 11,31	15,05	23,03	26,36	$M_{к}$ 27,14	24,35	$M_{мін}$ 18,1	$M_{п}$ 22,62
$M'(U_i)$, Н·м	0	$M'_{н}$ 9,16	12,2	18,65	21,35	$M'_{к}$ 21,99	19,72	$M'_{мін}$ 14,66	$M'_{п}$ 18,32

В прямокутній системі координат за даними таблиці 3 будуємо природну $\omega = f_1(M_{дв})$ та штучну $\omega = f_2(M'_{дв})$ механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором (рисунок 3).

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули.
- 3 Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній $\omega = f_1(M_{дв})$ та зниженій $\omega = f_2(M'_{дв})$ напрузі мережі.
- 4 Аналіз отриманих результатів.

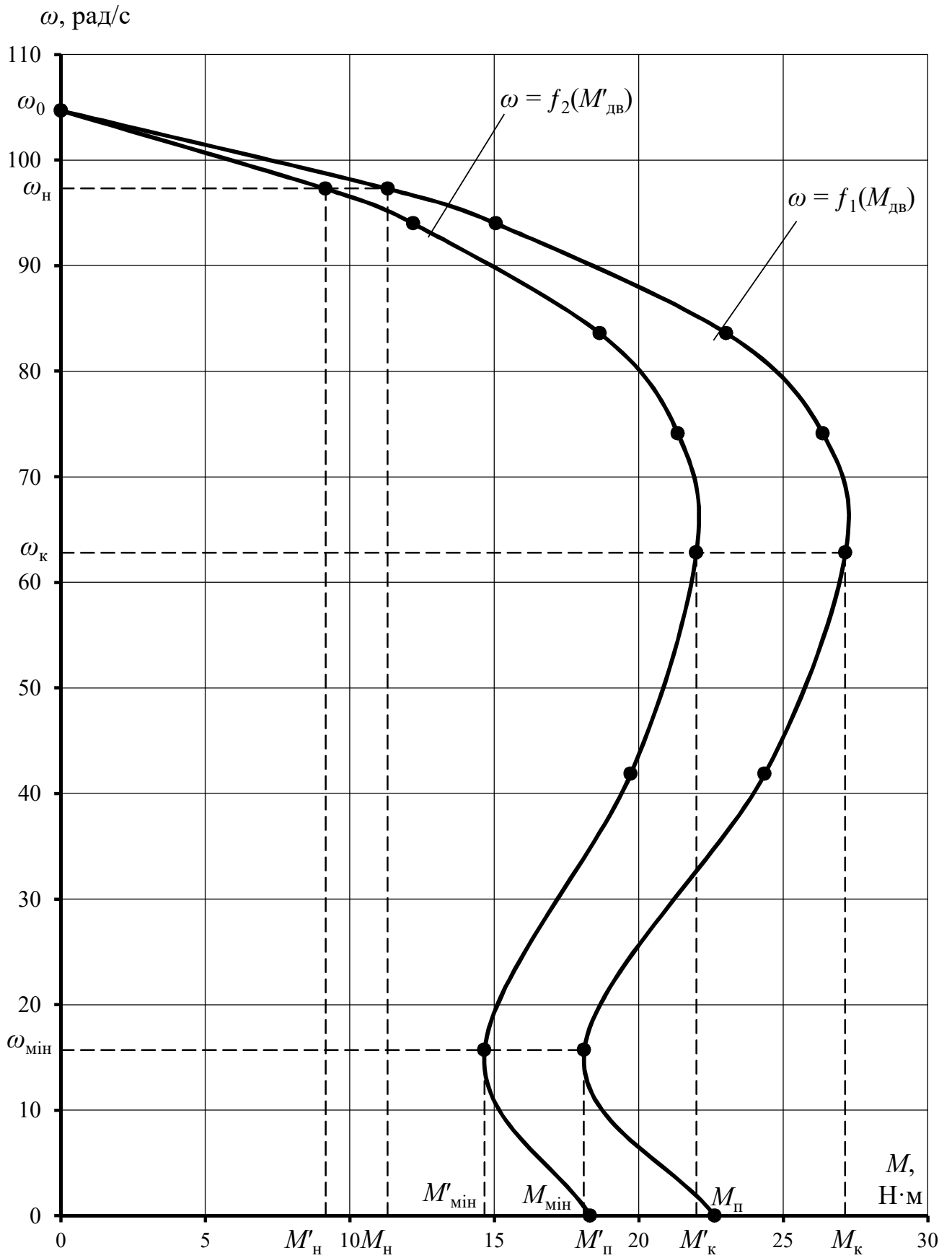


Рисунок 3 – Природна та штучна механічні характеристики АД при номінальній та зниженій напрузі мережі

6 Контрольні питання

- 1 Які технічні дані асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором наводяться в його паспортних даних?
- 2 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 3 Що називається природною та штучною механічною характеристиками асинхронного електродвигуна?
- 4 Які припущення допускаються при виведенні рівняння механічної характеристики асинхронного електродвигуна?
- 5 Як визначається синхронна кутова швидкість асинхронного електродвигуна?
- 6 Як за каталожними даними визначити номінальний момент на валу електродвигуна?
- 7 Як за каталожними даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?
- 8 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна? Як воно пов'язане зі швидкістю ротора?
- 9 Як визначити номінальне ковзання асинхронного двигуна?
- 10 Що таке критичне ковзання асинхронного двигуна і від чого воно залежить?
- 11 Як за каталожними даними визначити пусковий момент асинхронного електродвигуна?
- 12 Що таке максимальний момент та яким чином його можна розраховувати за каталожними даними?
- 13 Як за каталожними даними визначити мінімальний момент асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором?
- 14 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні?
- 15 Наведить уточнене та спрощене рівняння Клосса. Вкажіть області їх застосування.
- 16 Як залежать моменти асинхронного електродвигуна (номінальний, мінімальний, максимальний, пусковий) від величини підведеної до нього напруги?
- 17 За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором?

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ РОЗГОНУ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРОДВИГУН – РОБОЧА МАШИНА» МЕТОДОМ ГРАФОАНАЛІТИЧНОГО ІНТЕГРУВАННЯ РІВНЯННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» (ЕД-РМ) методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху електропривода.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» (ЕД-РМ) методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху електропривода [1, с. 115-121; 2, с. 133-140; 3, с. 45-48; 4, с. 130-136; 18].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок механічних характеристик виробничих машин [1, с. 31-33; 2, с. 7-8; 3, с. 32-38; 18].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для розрахунку часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» використати механічні характеристики (МХ) АД з короткозамкненим ротором при номінальній напрузі живлення $\omega = f_1(M_{дв})$, а також з урахуванням зниження напруги мережі від номінальної $\omega = f_2(M'_{дв})$, які були розраховані і побудовані в практичній роботі «Розрахунок механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором».

2.2 Розрахувати і побудувати МХ робочої машини $\omega = f_3(M_c)$.

2.3 Визначити час розгону системи «електродвигун-робоча машина» методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху електропривода шляхом побудови залежності $\omega = f_4(M_{дин})$ при номінальній напрузі живлення та $\omega = f_5(M'_{дин})$ з урахуванням зниження напруги мережі.

3 Загальні відомості і рекомендації

При розрахунку ЕП потрібно знати час пуску або гальмування системи електродвигун-робоча машина. Така необхідність виникає при розробці технологічних процесів, пов'язаних з частими пусками, гальмуванням і реверсуванням ЕД; при перевірці двигунів на нагрівання під час перехідних режимів тощо. У тих випадках, коли аналітичний розв'язок занадто складний або неможливий через відсутність точного рівняння МХ (наприклад, у АД з короткозамкненим ротором), час пуску визначають графічним або графоаналітичними методами.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електродвигуна	$P_{нз}$, кВт	$n_{н дз}$, об/хв.	$\mu_{п}$	$\mu_{мін}$	$\mu_{к}$	$J_{дз}$, кг·м ²	M_0 , Н·м	$M_{он}$, Н·м	$n_{н рм}$, об/хв.	$\eta_{пер}$, в.о.	$J_{рм}$, кг·м ²	x	ΔU , %
1	АИР80А2У3	1,5	2850	2,1	1,6	2,2	0,0018	1,0	10,0	950	0,95	0,12	1,3	25
2	АИР80В2У3	2,2	2850	2,0	1,6	2,2	0,0021	3,0	15,0	1425	0,93	0,1	2,1	20
3	АИР71А2У3	0,75	2820	2,1	1,6	2,2	0,00097	0,8	9,2	1320	0,97	0,045	1,6	15
4	АИР71В2У3	1,1	2800	2,1	1,6	2,2	0,0011	1,4	7,0	1405	0,93	0,03	1,5	22
5	АИР90L2У3	3,0	2850	2,0	1,6	2,2	0,0035	5,0	30,0	947	0,95	0,1	1,2	13
6	АИР100S2У3	4,0	2850	2,0	1,6	2,2	0,0059	6,0	27,0	1420	0,94	0,07	2,0	12
7	АИР100L2У3	5,5	2850	2,0	1,6	2,2	0,0075	7,0	35,0	1440	0,96	0,09	1,7	24
8	АИР160M2У3	18,5	2910	2,0	1,8	2,7	0,043	20,0	90,0	1450	0,93	0,22	2,0	15
9	АИР132M2У3	11,0	2910	1,6	1,2	2,2	0,023	12,0	65,0	1395	0,97	0,005	2,1	14
10	АИР160S2У3	15,0	2910	1,8	1,7	2,7	0,039	8,0	105,0	730	0,94	0,19	2,3	23
11	АИР80А4У3	1,1	1395	2,2	1,6	2,2	0,0032	2,5	14,0	740	0,98	0,06	1,2	10
12	АИР80В4У3	1,5	1395	2,2	1,6	2,2	0,0033	4,0	35,0	400	0,97	0,09	2,1	11
13	АИР90L4У3	2,2	1400	2,1	1,6	2,2	0,0056	5,0	28,0	710	0,98	0,1	1,7	25

Продовження таблиці 1

Варіант	Тип електродвигуна	$P_{нв}$, кВт	$n_{н д\bar{в}}$, об/хв.	$\mu_{п}$	$\mu_{спін}$	$\mu_{к}$	$J_{д\bar{в}}$, кг·м ²	M_0 , Н·м	$M_{0н}$, Н·м	$n_{н р\bar{м}}$, об/хв.	$\eta_{пер}$, в.о.	$J_{р\bar{м}}$, кг·м ²	x	ΔU , %
14	АИР100S4У3	3,0	1410	2,0	1,6	2,2	0,0087	12,0	60,0	480	0,96	0,16	2,3	13
15	АИР100L4У3	4,0	1410	2,0	1,6	2,2	0,011	10,0	55,0	715	0,96	0,4	1,5	19
16	АИР112M4У3	5,5	1430	2,0	1,6	2,2	0,017	15,0	72,0	722	0,97	0,5	2,0	21
17	АИР160S4У3	15,0	1455	1,9	1,8	2,9	0,078	30,0	300,0	580	0,97	1,2	1,2	10
18	АИР160M4У3	18,5	1455	1,9	1,8	2,9	0,100	50,0	250,0	730	0,95	1,2	2,0	12
19	АИР160S6У3	11,0	970	2,0	1,6	2,7	0,120	40,0	180,0	450	0,95	0,09	2,0	22
20	АИР160M6У3	15,0	970	2,0	1,6	2,7	0,150	30,0	150,0	500	0,97	0,1	1,0	25
21	АИР80B6У3	1,1	920	2,0	1,6	2,2	0,0046	4,0	44,0	230	0,92	0,6	1,5	18
22	АИР90L6У3	1,5	925	2,0	1,6	2,2	0,0073	5,0	45,0	312	0,95	0,5	1,4	11
23	АИР100L6У3	2,2	945	2,0	1,6	2,2	0,013	10,0	95,0	238	0,96	1,2	1,4	10
24	АИР112MA6У3	3,0	950	2,0	1,6	2,2	0,017	8,0	61,0	472	0,97	0,9	2,1	23
25	АИР112MB6У	4,0	950	2,0	1,6	2,2	0,021	10,0	80,0	420	0,96	10,0	1,1	13

Вихідними даними для розрахунку є:

- механічна характеристика електродвигуна $\omega = f(M_{\text{дв}})$;
- механічна характеристика виробничого механізму, зведена до вала електродвигуна $\omega = f(M_c)$;
- зведений до вала електродвигуна момент інерції системи електродвигун – робоча машина $J_{\text{зв}}$.

Механічною характеристикою електродвигуна оберտального руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M_{\text{дв}})$.

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту статичних опорів від кутової швидкості її приводного вала $\omega = f(M_c)$.

Зведену до вала електродвигуна механічну характеристику робочої машини розраховують за рівнянням Бланка

$$M_c = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{н}}} \right)^x, \quad (1)$$

де M_c – момент опору при швидкості ω ,

M_0 – момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення), який не залежить від швидкості, Н·м;

$M_{\text{сн}}$ – момент опору при номінальній кутовій швидкості $\omega_{\text{н}}$, Н·м;

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

ω_i – поточне значення кутової швидкості, рад/с;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Приведений до вала електродвигуна номінальний момент опору робочої машини, $M_{\text{сн}}$, Н·м, визначається за формулою

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{0\text{н}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}}, \quad (2)$$

де $M_{0\text{н}}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

i – передаточне число механізму, в.о.;

$\eta_{\text{пер}}$ – коефіцієнт корисної дії передачі, в.о.

Передаточне число механізму, i , в.о., визначається за формулою

$$i = \frac{n_{\text{ндв}}}{n_{\text{нрм}}}, \quad (3)$$

де $n_{\text{нрм}}$ – номінальна частота обертанья робочої машини, об/хв.

У разі відсутності даних про момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення робочої машини) M_0 , Н·м, його можна прийняти рівним

$$M_0 = (0,1...0,3) \cdot M_{сн}. \quad (4)$$

Задаючи значення ω від 0 до ω_0 розраховують залежність $\omega = f_3(M_c)$. Результати розрахунків зручно звести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані розрахунку механічної характеристики робочої машини

ω , рад/с	0								ω_0
M_c , Н·м									

На основі розрахункових даних таблиці 2 будують механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_c)$ на тому ж графіку, що і механічні характеристики електродвигуна при номінальній $\omega = f_1(M_{дв})$ та зниженій $\omega = f_2(M'_{дв})$ напрузі мережі.

Для визначення часу пуску двигуна графічно знаходять $M_{дин} = M_{дв} - M_c$ та $M'_{дин} = M'_{дв} - M_c$ і будують графік динамічного моменту при номінальній напрузі мережі $\omega = f_4(M_{дин})$ та з урахуванням зниження напруги мережі $\omega = f_5(M'_{дин})$.

Графіки $\omega = f_4(M_{дин})$ та $\omega = f_5(M'_{дин})$ поділяють на окремі ділянки через довільні проміжки кутової швидкості $\Delta\omega$ і знаходять середнє значення динамічного моменту $M_{динсер}$ та $M'_{динсер}$ на кожній ділянці. Значення $\Delta\omega$ вибирають такими, щоб забезпечити достатню точність визначення $M_{динсер}$ при номінальній напрузі та $M'_{динсер}$ з урахуванням зниження напруги мережі.

Час пуску приводу на кожній ділянці визначається за виразом

$$\Delta t_i = J_{зв} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{динсерi}}, \quad (5)$$

де $\Delta\omega_i$ – приріст кутової швидкості на i -й ділянці, рад/с;

$M_{динсерi}$ – середнє значення динамічного моменту на i -й ділянці, Н·м.

Зведений до вала двигуна момент інерції $J_{зв}$, кг·м², частин електропривода, що рухаються, дорівнює

$$J_{зв} = J_{дв} + J_{пер} + \frac{J_{рм}}{i^2}, \quad (6)$$

де $J_{дв}$ – момент інерції ротора електродвигуна, кг·м²;

$J_{\text{пер}}$ – момент інерції передачі, кг·м²;

$J_{\text{рм}}$ – момент інерції робочої машини, кг·м²;

i – передаточне число механізму.

Момент інерції передачі, $J_{\text{пер}}$, кг·м², приймається рівним

$$J_{\text{пер}} = 0,2 \cdot J_{\text{дв}}.$$

Знаючи тривалість розгону на кожній ділянці, загальний час пуску системи «електродвигун-робоча машина» визначається за виразом

$$t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i.$$

Результати розрахунків зручно звести до таблиці 3 та таблиці 4.

Таблиця 3 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» при номінальній напрузі мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\omega_{\text{поч}}$, рад/с												
$\omega_{\text{кін}}$, рад/с												
$\Delta\omega$, рад/с												
$M_{\text{дин сер } i} (U_{\text{н}})$, Н·м												
$\Delta t_i (U_{\text{н}})$, с												
$t_{\text{п}} (U_{\text{н}})$, с												

Таблиця 4 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» з урахуванням зниження напруги мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\omega_{\text{поч}}$, рад/с												
$\omega_{\text{кін}}$, рад/с												
$\Delta\omega$, рад/с												
$M'_{\text{дин сер } i} (U_i)$, Н·м												
$\Delta t_i (U_i)$, с												
$t_{\text{п}} (U_i)$, с												

4 Приклад розрахунку

Визначити час розгону системи «електродвигун-робоча машина» методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху електропривода.

Паспортні дані робочої машини:

$$\begin{aligned} M_0 &= 0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}; & M_{0\text{H}} &= 4,0 \text{ Н}\cdot\text{м}; & n_{\text{H}} &= 935 \text{ об/хв.}; \\ \eta_{\text{пер}} &= 0,97; & J_{\text{рм}} &= 0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; & x &= 2. \end{aligned}$$

Технічні дані електродвигуна 5А80МВ6 приведені в практичній роботі «Розрахунок механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором». Каталожні дані АД:

$$\begin{aligned} P_{\text{H}} &= 1,1 \text{ кВт}; & U_{\text{H}} &= 380 \text{ В}; & I_{\text{H}} &= 3,3 \text{ А}; & n_{\text{H}} &= 930 \text{ об/хв.}; \\ \eta_{\text{H}} &= 72 \%; & \cos\varphi_{\text{H}} &= 0,7 & K_i &= 4,5; & J_{\text{дв}} &= 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \\ \mu_{\text{H}} &= 2,0; & \mu_{\text{мін}} &= 1,6; & \mu_{\text{к}} &= 2,4; & K_U &= 0,9; & m &= 16 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Механічну характеристику робочої машини розраховуємо за рівнянням Бланка

$$M_{\text{с}} = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{H}}} \right)^x,$$

де $M_{\text{с}}$ – момент опору при швидкості ω ,

M_0 – момент опору тертя в рухомих частинах, який не залежить від швидкості, Н·м;

$M_{\text{сн}}$ – момент опору при номінальній швидкості ω_{H} , Н·м;

ω_{H} – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

ω_i – поточне значення кутової швидкості, рад/с;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Приведений до вала електродвигуна номінальний момент опору робочої машини, $M_{\text{сн}}$, Н·м, визначаємо за формулою

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{0\text{H}}}{i \cdot \eta_{\text{пер}}},$$

де $M_{0\text{H}}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

i – передаточне число механізму, в.о.;

$\eta_{\text{пер}}$ – коефіцієнт корисної дії передачі, в.о.

Передаточне число механізму, i , в.о., визначаємо за формулою

$$i = \frac{n_{\text{Hдв}}}{n_{\text{Hрм}}},$$

де $n_{нрм}$ – номінальна частота обертання робочої машини, об/хв.

$$i = \frac{930}{935} = 0,99;$$

$$M_{сн} = \frac{4,0}{0,99 \cdot 0,97} = 4,17 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо синхронну кутову швидкість робочої машини

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для АД з короткозамкненим ротором типу 5А80МВ6 $p = 3$. Тоді

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с}.$$

Визначаємо номінальну кутову швидкість електродвигуна

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30},$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 930}{30} = 97,3 \text{ рад/с}.$$

Механічну характеристику робочої машини розраховуємо за рівнянням

$$M_c = 0,8 + (4,17 - 0,8) \cdot \left(\frac{\omega_i}{97,34} \right)^2,$$

задаючи значення кутової швидкості ω від 0 до ω_0 та будуємо залежність $\omega = f_3(M_c)$.

Результати розрахунків зводимо до таблиці 5.

Таблиця 5 – Дані розрахунку механічної характеристики робочої машини

ω , рад/с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	104,7
M_c , Н·м	0,80	0,84	0,94	1,12	1,37	1,69	2,08	2,54	3,08	3,68	4,35	4,70

На основі розрахункових даних будуємо механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_c)$ на тому ж графіку, що і механічні характеристики електродвигуна при номінальній напрузі мережі $\omega = f_1(M_{дв})$ та з урахуванням зниження напруги мережі $\omega = f_2(M'_{дв})$.

Для визначення часу пуску двигуна графічно знаходимо різницю $M_{дин} = M_{дв} - M_c$ та $M'_{дин} = M'_{дв} - M_c$ і будуємо графік динамічного моменту при номінальній напрузі мережі $\omega = f_4(M_{дин})$ (рисунок 1) та з урахуванням зниження напруги мережі $\omega = f_5(M'_{дин})$ (рисунок 2).

Графіки $\omega = f_4(M_{дин})$ та $\omega = f_5(M'_{дин})$ поділяємо на окремі ділянки через довільні проміжки кутової швидкості $\Delta\omega$ і знаходимо середнє значення динамічного моменту $M_{дин\text{сер}}$ та $M'_{дин\text{сер}}$ на кожній ділянці. Значення $\Delta\omega$ вибираємо такими, щоб забезпечити достатню точність визначення $M_{дин\text{сер}}$ при номінальній напрузі та $M'_{дин\text{сер}}$ з урахуванням зниження напруги мережі.

Час пуску приводу на кожній ділянці при номінальній напрузі та з урахуванням зниження напруги визначаємо за виразами

$$\Delta t_i = J_{зв} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{дин\text{сер}i}};$$

$$\Delta t'_i = J_{зв} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M'_{дин\text{сер}i}},$$

де $\Delta\omega_i$ – приріст кутової швидкості на i -й ділянці, рад/с;

$M_{дин\text{сер}i}$, $M'_{дин\text{сер}i}$ – відповідно середнє значення динамічного моменту на i -й ділянці при номінальній та зниженій напрузі мережі, Н·м.

Зведений до вала двигуна момент інерції $J_{зв}$, кг·м², частин електропривода, що рухаються, дорівнює

$$J_{зв} = J_{дв} + J_{пер} + \frac{J_{рм}}{i^2},$$

де $J_{дв}$ – момент інерції ротора електродвигуна, кг·м²;

$J_{пер}$ – момент інерції передачі, кг·м²;

J_{pm} – момент інерції робочої машини, кг·м²;

i – передаточне число механізму.

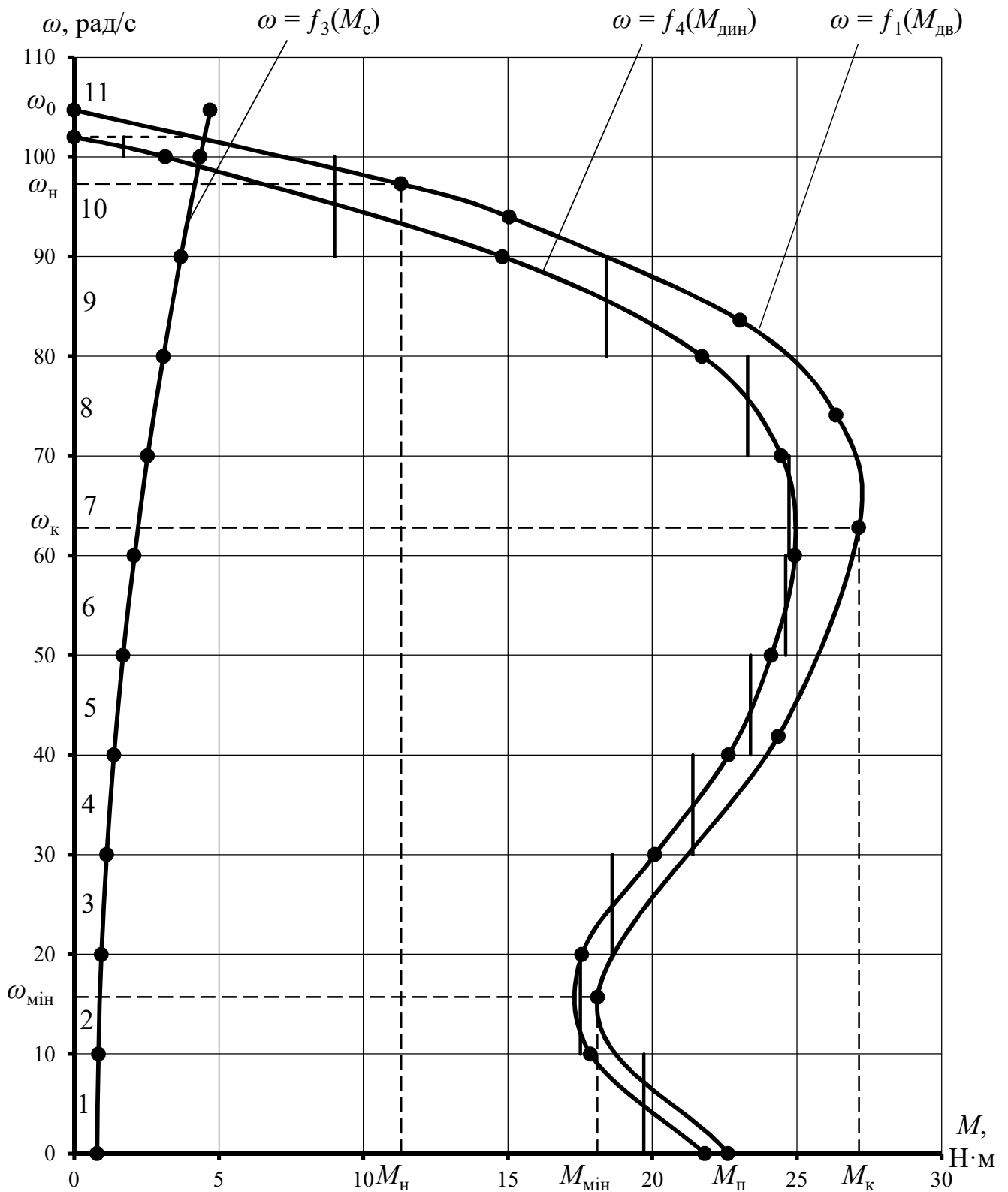


Рисунок 1 – Механічні характеристики електродвигуна і робочої машини для визначення динамічного моменту при номінальній напрузі мережі

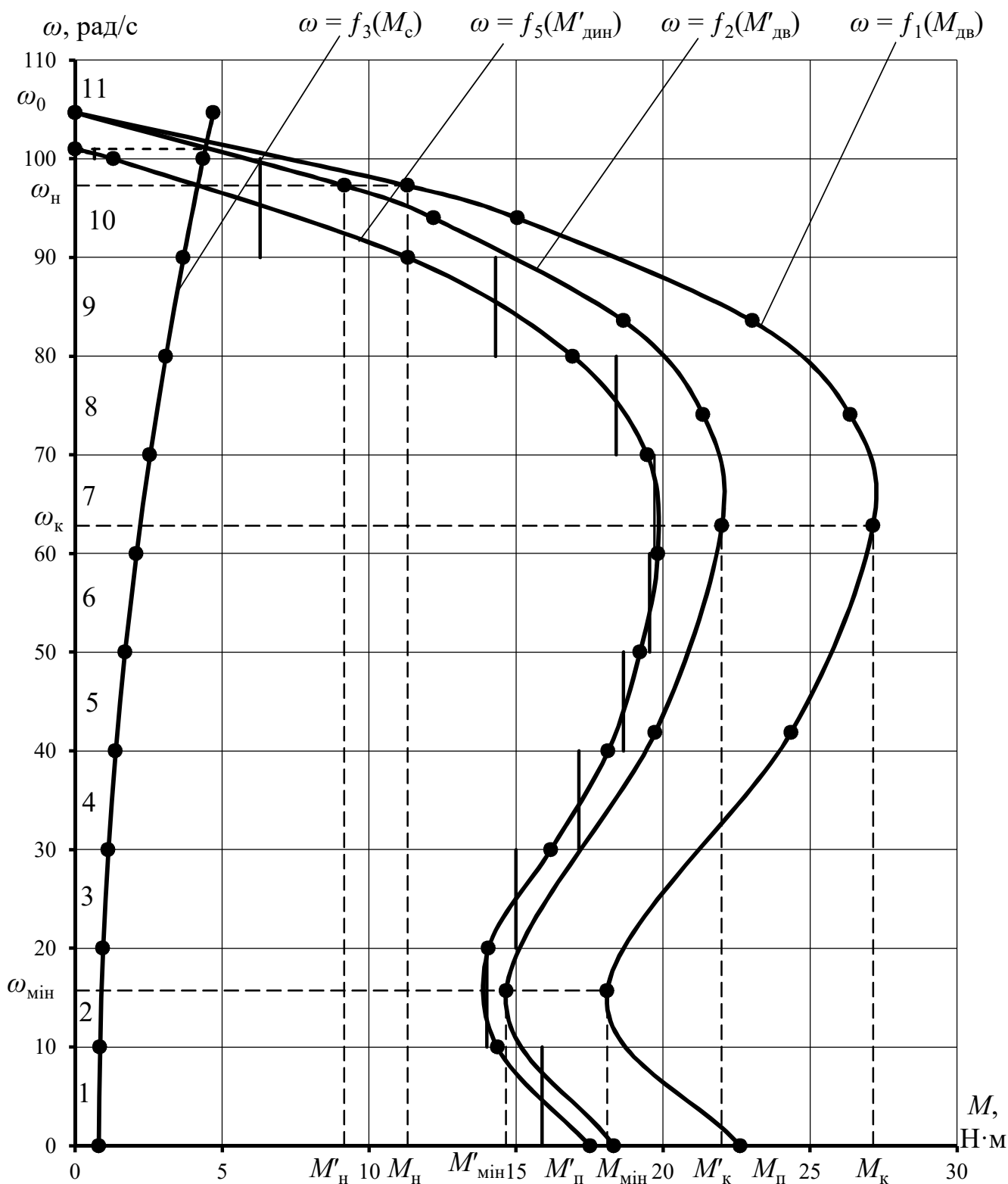


Рисунок 2 – Механічні характеристики електродвигуна і робочої машини для визначення динамічного моменту з урахуванням зниження напруги мережі

Момент інерції передачі, $J_{пер}$, $кг \cdot м^2$, приймаємо рівним

$$J_{пер} = 0,2 \cdot J_{дв}.$$

Згідно каталожних даних $J_{дв} = 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_{рм} = 0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Отже

$$J_{пер} = 0,2 \cdot 0,0048 = 0,00096 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 ;$$

$$J_{зв} = 0,0048 + 0,00096 + \frac{0,01}{0,99^2} = 0,016 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 .$$

Знаючи тривалість розгону на кожній ділянці, загальний час пуску системи «електродвигун-робоча машина» визначаємо за виразом

$$t_{п} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i ;$$

$$t'_{п}(U_i) = \sum_{i=1}^n \Delta t'_i(U_i).$$

Результати розрахунків часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» зводимо до таблиць 6 та 7.

Таблиця 6 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» при номінальній напрузі мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5
$\omega_{поч}$, рад/с	0	10	20	30	40
$\omega_{кін}$, рад/с	10	20	30	40	50
$\Delta\omega$, рад/с	10	10	10	10	10
$M_{дин\ сер\ i}(U_n)$, Н·м	19,7	17,5	18,6	21,4	23,4
$\Delta t_i(U_n)$, с	0,0081	0,0091	0,0086	0,0075	0,0068
$t_{п}(U_n)$, с	0,0081	0,0172	0,0258	0,0333	0,0401

Продовження таблиці 6

№ ділянки	6	7	8	9	10	11
$\omega_{поч}$, рад/с	50	60	70	80	90	100
$\omega_{кін}$, рад/с	60	70	80	90	100	102
$\Delta\omega$, рад/с	10	10	10	10	10	2
$M_{дин\ сер\ i}(U_n)$, Н·м	24,6	24,7	23,3	18,4	9	1,7
$\Delta t_i(U_n)$, с	0,0065	0,0065	0,0069	0,0087	0,0178	0,0188
$t_{п}(U_n)$, с	0,0466	0,0531	0,0600	0,0687	0,0865	0,1053

Таблиця 7 – Розрахунок часу пуску системи «електродвигун-робоча машина» з урахуванням зниження напруги мережі

№ ділянки	1	2	3	4	5
$\omega_{\text{поч}}$, рад/с	0	10	20	30	40
$\omega_{\text{кін}}$, рад/с	10	20	30	40	50
$\Delta\omega$, рад/с	10	10	10	10	10
$M'_{\text{дин сер } i}(U_i)$, Н·м	15,9	14,0	15,0	17,1	18,6
$\Delta t_i(U_i)$, с	0,0101	0,0114	0,0107	0,0094	0,0086
$t_{\text{п}}(U_i)$, с	0,0101	0,0215	0,0322	0,0416	0,0502

Продовження таблиці 7

№ ділянки	6	7	8	9	10	11
$\omega_{\text{поч}}$, рад/с	50	60	70	80	90	100
$\omega_{\text{кін}}$, рад/с	60	70	80	90	100	101
$\Delta\omega$, рад/с	10	10	10	10	10	1
$M'_{\text{дин сер } i}(U_i)$, Н·м	19,5	19,7	18,4	14,3	6,3	0,65
$\Delta t_i(U_i)$, с	0,0082	0,0081	0,0087	0,0112	0,0254	0,2462
$t_{\text{п}}(U_i)$, с	0,0584	0,0665	0,0752	0,0864	0,1118	0,358

Отже, час пуску системи «електродвигун – робоча машина» при номінальній напрузі мережі дорівнює

$$t_{\text{п}} = 0,1053 \text{ с ,}$$

а з урахуванням зниження напруги мережі

$$t_{\text{п}}(U_i) = 0,358 \text{ с .}$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Таблиці з результатами розрахунків.
- 4 Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором при номінальній $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$ та зниженій $\omega = f_2(M'_{\text{дв}})$ напрузі мережі.
- 5 Механічну характеристику робочої машини $\omega = f_3(M_c)$.
- 6 Залежності $\omega = f_4(M_{\text{дин}})$ при номінальній напрузі та $\omega = f_5(M'_{\text{дин}})$ з урахуванням зниження напруги мережі.
- 7 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Які процеси в електромеханічній системі відносять до перехідних?
- 2 Які види інерції діють в системах електропривод – робоча машина?
- 3 Навіщо потрібно знати час пуску (гальмування) системи електродвигун – робоча машина?
- 4 Яку залежність називають механічною характеристикою електродвигуна?
- 5 Яку залежність називають механічною характеристикою робочої машини?
- 6 Якою емпіричною формулою описують механічну характеристику виробничого механізму? Проаналізуйте її.
- 7 За якою ознакою класифікують механічні характеристики виконавчих органів робочих машин і на які групи їх можна поділити?
- 8 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = 0$?
- 9 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = 1$?
- 10 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = 2$?
- 11 Який вигляд мають механічні характеристики робочих машин з показником степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості $x = -1$?
- 12 Наведіть основне рівняння руху електропривода і проаналізуйте його.
- 13 Що називається моментом інерції?
- 14 За яким рівнянням визначають час пуску системи електродвигун-робоча машина?
- 15 Чому доводиться визначати час пуску системи електродвигун-робоча машина графоаналітичним методом?
- 16 Які вихідні дані необхідні для визначення часу пуску системи електродвигун-робоча машина графоаналітичним методом?
- 17 Яка послідовність розрахунку тривалості пуску електродвигуна графоаналітичним методом?
- 18 Як будується залежність динамічного моменту від кутової швидкості?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ГАЛЬМУВАННІ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при динамічному гальмуванні.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: природні та штучні механічні характеристики асинхронного двигуна, їх розрахунок і побудова [1, с. 87-94; 2, с. 38-44; 4, с. 82-98; 24].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: гальмівні режими трифазних асинхронних двигунів [1, с. 94-98; 2, 44-47; 3, с. 82-88; 5, с. 54-60; 10, с. 96-104; 24].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Накреслити схему підключення постійного струму до обмотки статора електродвигуна і діаграму магніторушійних сил (МРС).

2.2 Визначити струм холостого ходу електродвигуна в іменованих і відносних одиницях, якщо відомі параметри Г-подібної схеми заміщення електродвигуна.

2.3 Визначити величину еквівалентного струму і постійного струму від випрямляча при динамічному гальмуванні.

2.4 Визначити значення максимального моменту і максимального ковзання при динамічному гальмуванні.

2.5 Визначити значення моментів динамічного гальмування для різних значень ковзання і побудувати графік механічної характеристики при динамічному гальмуванні.

3 Загальні відомості і рекомендації

Для асинхронних двигунів застосовують такі способи гальмування: рекуперативне, противмиканням та динамічне гальмування із збудженням постійним або змінним струмом. Щоб створити режим динамічного гальмування асинхронного двигуна із збудженням постійним струмом, необхідно вимкнути двигун із мережі змінного струму і увімкнути його в мережу постійного струму за однією із схем, зображених на рисунку 1, обмеживши постійний струм до значення $I_{\text{пост}} = (3 - 4)I_{\text{х.х.}}$, де $I_{\text{х.х.}}$ – струм холостого ходу двигуна, А.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Типорозмір двигуна	P_H , кВт	I_H , А	S_H , в.о.	ω_0 , рад/с	X_μ , Ом	μ_K , в.о.	S_K , в.о.	R'_2 , Ом	$i_{\text{екв}}$, в.о.	$\mu_{\text{п}}$, в.о.	$\mu_{\text{мін}}$, в.о.
1	4A71B2Y3	1,1	2,5	0,063	314	249	2,2	0,390	6,41	2,0	2,0	1,5
2	4A80A2Y3	1,5	3,3	0,042	314	167	2,6	0,355	3,27	2,5	2,1	1,4
3	4A80B2Y3	2,2	4,6	0,043	314	129	2,6	0,380	2,34	3,0	2,1	1,4
4	4A90L2Y3	3,0	6,1	0,043	314	122	2,5	0,325	2,05	3,5	2,1	1,6
5	4A100S2Y3	4,0	7,9	0,033	314	95	2,5	0,280	1,01	4,0	2,0	1,6
6	4A100L2Y3	5,5	10,5	0,034	314	79,9	2,5	0,170	0,757	4,5	2,0	1,6
7	4A112M2Y3	7,5	14,8	0,025	314	55,2	2,8	0,190	0,417	2,0	2,0	1,8
8	4A132M2Y3	11,0	21,0	0,023	314	43,9	2,8	0,120	0,241	2,5	1,7	1,5
9	4A160S2Y3	15,0	28,4	0,021	314	31,0	2,2	0,125	0,171	3,0	1,4	1,0
10	4A160M2Y3	18,5	34,4	0,021	314	28,8	2,2	0,125	0,141	3,5	1,4	1,0
11	4A80A4Y3	1,1	2,74	0,054	157	136	2,2	0,340	5,45	4,0	2,0	1,6
12	4A80B4Y3	1,5	3,56	0,058	157	118	2,2	0,345	4,26	4,5	2,0	1,6
13	4A90L4Y3	2,2	5,0	0,051	157	92	2,4	0,330	2,63	2,0	2,1	1,6
14	4A100S4Y3	3,0	6,68	0,044	157	72,5	2,4	0,310	1,75	2,5	2,0	1,6
15	4A100L4Y3	4,0	8,60	0,046	157	61,5	2,4	0,315	1,36	3,0	2,0	1,6
16	4A112M4Y3	5,5	11,5	0,036	157	53,7	2,0	0,25	0,787	3,5	2,0	1,6
17	4A132S4Y3	7,5	15,1	0,029	157	43,7	3,0	0,195	0,481	4,0	2,2	1,7
18	4A132M4Y3	11,0	21,9	0,028	157	32,1	3,0	0,195	0,321	4,5	2,2	1,7
19	4A160S4Y3	15,0	29,2	0,023	157	30,2	2,3	0,16	0,188	2,0	1,4	1,0
20	4A160M4Y3	18,5	35,6	0,022	157	26,6	2,3	0,16	0,148	2,5	1,4	1,0
21	4A80B6Y3	1,1	3,0	0,080	104,7	116	2,2	0,38	7,95	3,0	2,0	1,6
22	4A90L6Y3	1,5	4,0	0,064	104,7	96,7	2,2	0,31	4,73	3,5	2,0	1,7
23	4A100L6Y3	2,2	5,6	0,051	104,7	74,1	2,2	0,25	2,61	4,0	2,0	1,6
24	4A112MA6Y3	3,0	7,4	0,047	104,7	56,6	2,5	0,37	1,88	4,5	2,0	1,8
25	4A112MB6Y3	4,0	9,1	0,051	104,7	48,2	2,5	0,38	1,49	2,0	2,0	1,8

При динамічному гальмуванні постійний струм, що проходить в обмотці статора, створює нерухоме в просторі магнітне поле, в якому обертається ротор двигуна. В обмотці ротора наводиться електрорушійна сила (ЕРС), під дією якої в замкненому колі цієї обмотки виникає змінний струм. При взаємодії струму ротора з нерухомим магнітним полем статора створюється гальмівний момент. Коли кутова швидкість ротора знижується до нуля, ЕРС, струм в обмотці ротора і гальмівний момент також зменшуються до нуля. Після зупинки ротора двигун вимикають.

В таблицях 2-6 представлені різні схеми вмикання обмоток статора при живленні їх від джерела постійного струму, а також відповідні до цієї схеми:

- векторна діаграма просторового додавання намагнічуючих сил фаз статора. При цьому припущено, що число послідовно з'єднаних витків в фазі складає w_1 ;

- значення магніторушійної сили F_{Π} , яка створюється обмоткою статора при живленні постійним струмом, пропорційна постійному струму I_{Π} , числу витків фази статора w_1 і залежить від схеми з'єднання;

- значення діючого еквівалентного трифазного змінного струму $I_{\text{екв}}$, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{Π} ;

- значення постійного струму I_{Π} , необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{Π} ;

- величина опору R_{Π} постійному струму обмотки статора;

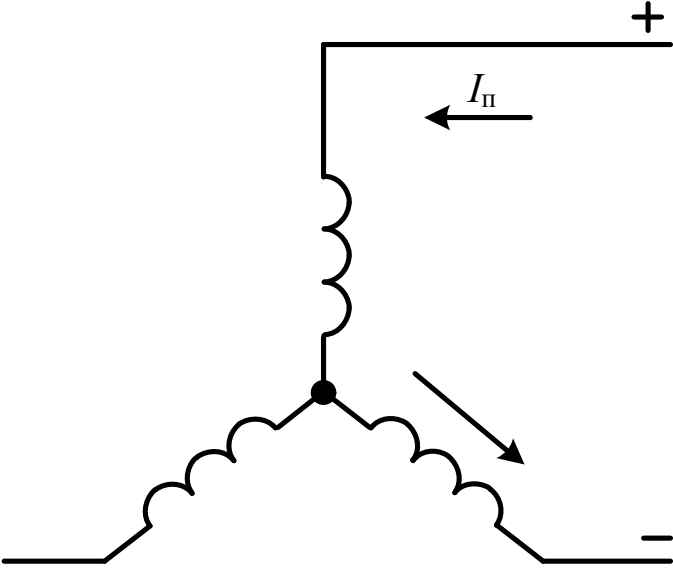
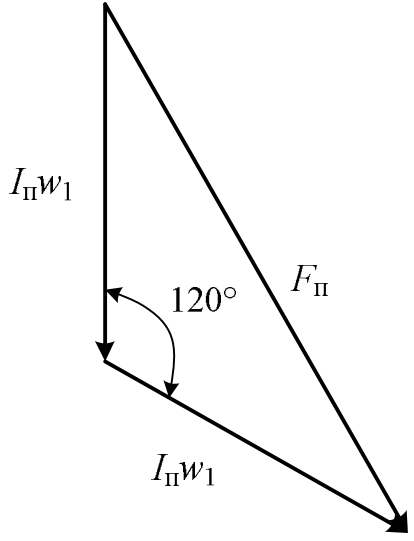
- величина напруги U_{Π} постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$;

- величина потужності P_{Π} постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$.

Для всіх схем, крім схеми 5, струм $I_{\text{екв}}$ еквівалентний постійному не тільки за величиною намагнічуючої сили, але і за потужністю, що втрачається в опорах обмотки статора. Для схеми 5 ця потужність більша, ніж у схемах 1-4, і тому вона, з точки зору втрат потужності, є найбільш не вигідною, тоді як схеми 1-4 з цієї точки зору є рівноцінними і більш вигідними.

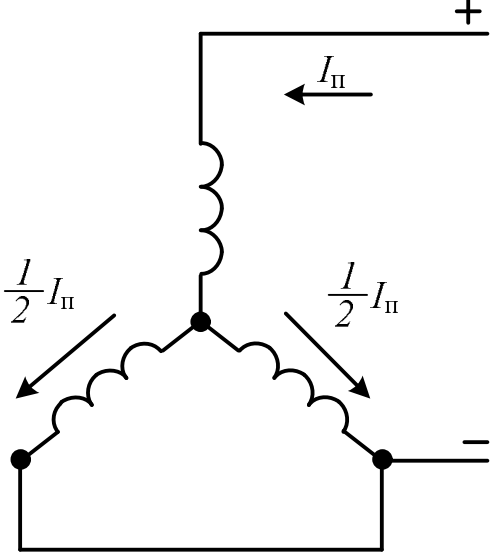
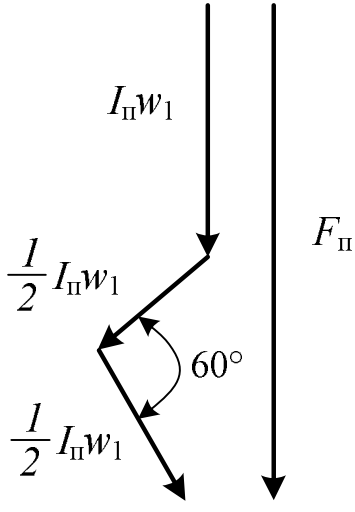
Динамічне гальмування АД може здійснюватися двома способами: динамічне гальмування при незалежному збудженні; динамічне гальмування при самозбудженні. Якщо динамічне гальмування АД здійснювати за класичною схемою, то при відключенні АД від мережі і замиканні кола статора, двигун буде розвивати дуже малий гальмівний момент (малою буде ЕРС, оскільки вона буде викликана тільки залишковим намагнічуванням, бо основний магнітний потік АД створюється реактивним струмом статора при живленні його від мережі, а статор знеструмлений).

Таблиця 2

Схема 1	Векторна діаграма схеми 1
	
Магніторухійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1 \cdot \sqrt{3}$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{II}	$I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{II}	$I_{II} = 1,22 \cdot I_{екв}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = 2R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{екв}$	$U_{II} = 2,44 \cdot I_{екв} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{екв}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{екв}^2 \cdot R_1$

Для створення належного гальмівного моменту слід створити при цьому магнітний потік, подавши у коло статора на період гальмування, постійний струм, тобто штучно створити на час гальмування незалежне збудження. У загальному вигляді схема гальмування при незалежному збудженні показана на рисунку 2. Якщо при цьому АД буде не короткозамкнений, а фазний, то у коло ротора вмикається додатковий активний опір $R_{2д}$, при регулюванні якого можна обмежувати струм ротора і змінювати параметри гальмування.

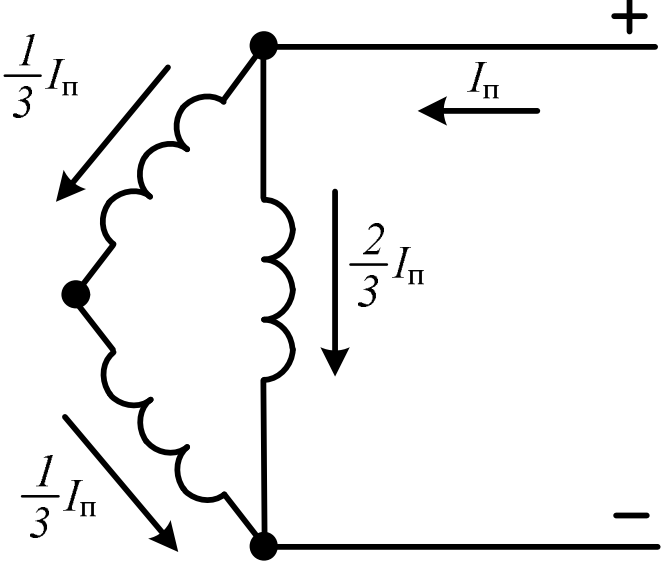
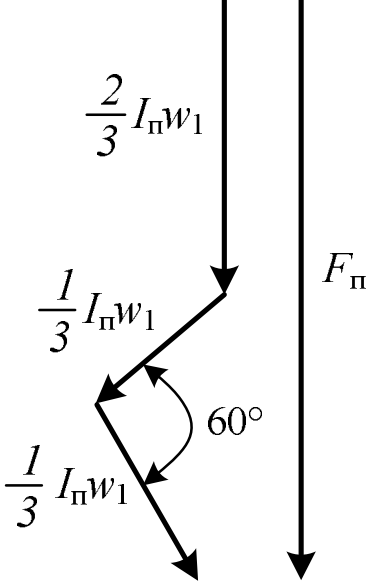
Таблиця 3

Схема 2	Векторна діаграма схеми 2
	
Магніторушійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1 \cdot \frac{3}{2}$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{II}	$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{II}	$I_{II} = 1,41 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = 1,5R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{II} = 2,12 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

Таким вмиканням АД перетворюється у синхронний генератор з неявно вираженими полюсами, що працює при змінній частоті, навантаженням для якого є струм ротора.

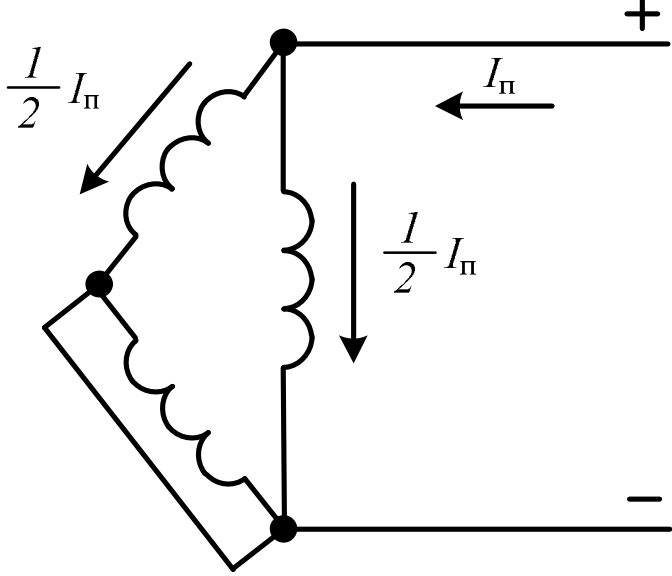
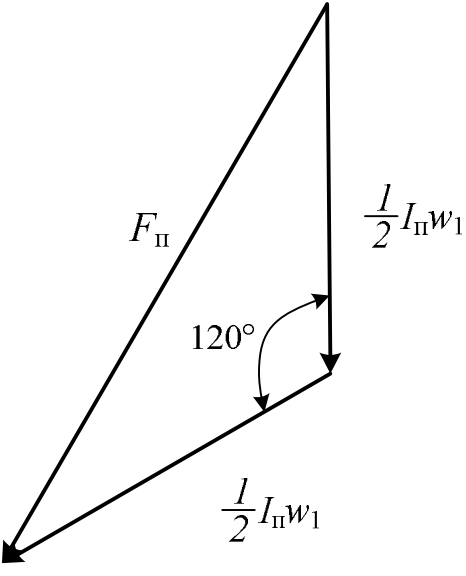
При живленні постійним струмом обмотка статора буде мати значно менший опір ніж при живленні змінним струмом, оскільки опір при живленні постійним струмом має тільки активну складову (а змінним – активну та індуктивну складові).

Таблиця 4

Схема 3	Векторна діаграма схеми 3
	
Магніторушійна сила обмотки статора	$F_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot w_1$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{Π}	$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot I_{\Pi}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{Π}	$I_{\Pi} = 2,12 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{\Pi} = \frac{2}{3} R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{\Pi} = 1,41 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{\Pi} = 3 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

За цих умов напруга збудження U_3 суттєво менша напруги живлення U_1 змінним струмом. Джерелом незалежного збудження при динамічному гальмуванні АД найчастіше використовується статичний випрямляч VD , що живиться від знижувального трансформатора TH , в основному VD і TH нерегульовані (рисунок 3).

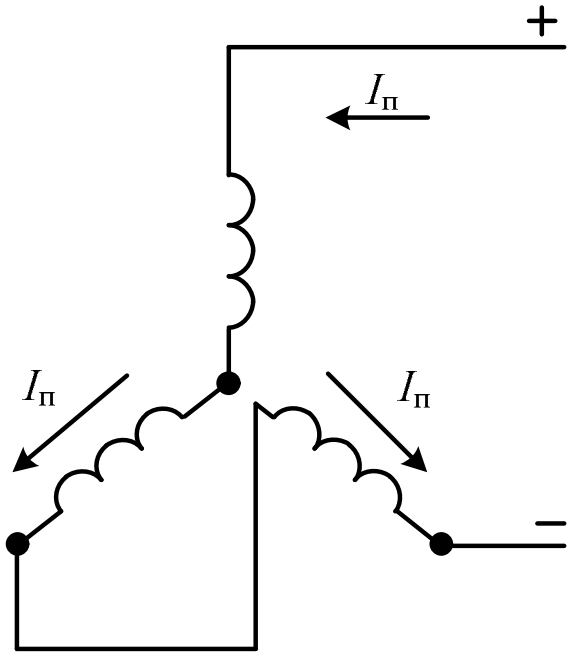
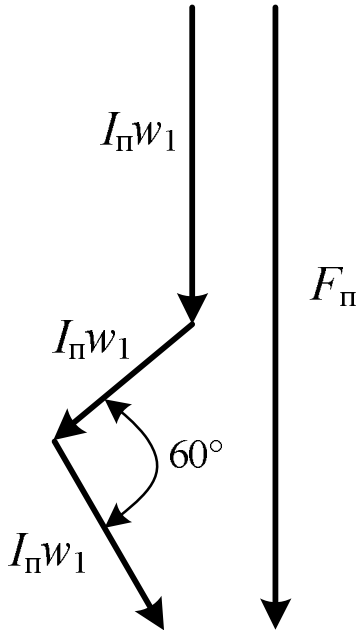
Таблиця 5

Схема 4	Векторна діаграма схеми 4
	
Магніторухійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{II}	$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{II}	$I_{II} = 2,45 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = \frac{1}{2} R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{II} = 1,22 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

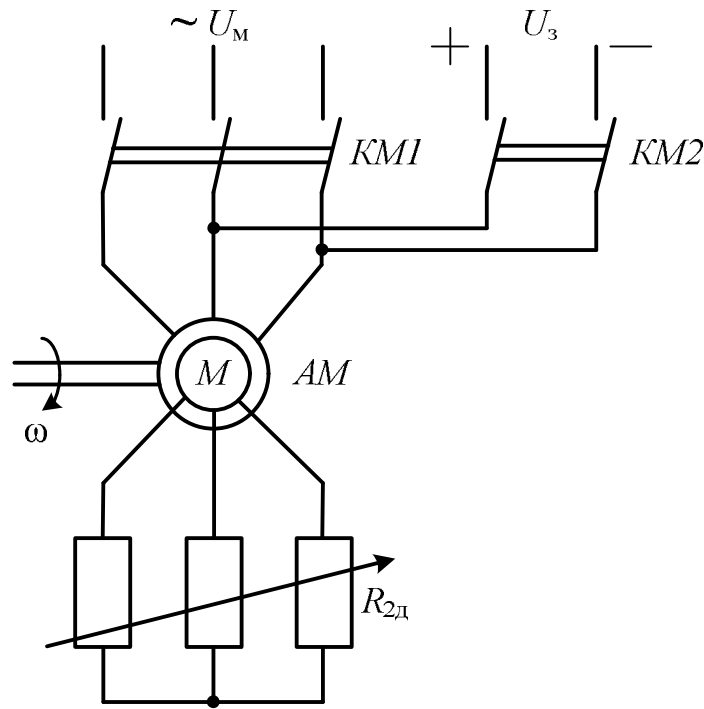
Механічні характеристики цього гальмівного режиму розташовані у другому квадранті, за формою нагадують механічні характеристики режиму двигуна (рисунок 4).

Усі характеристики виходять з однієї точки 0 ($\omega = 0, S = 1$), оскільки при швидкості рівній нулю і $M = 0$.

Таблиця 6

Схема 5	Векторна діаграма схеми 5
	
Магніторушійна сила обмотки статора	$F_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot w_1 \cdot 2$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{Π}	$I_{\text{екв}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot I_{\Pi}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора F_{Π}	$I_{\Pi} = 1,05 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{\Pi} = 3R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{\Pi} = 3,18 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{\Pi} = 3,37 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

Характеристики зображені для двох значень магніторушійної сили (МРС) статора F_1 та F_2 і для трьох значень активного опору в колі ротора, відповідно для $R_{2д1}(\omega_{к1})$, $R_{2д2}(\omega_{к2})$ та $R_{2д3}(\omega_{к3})$.



KM1 замкнений, *KM2* розімкнений – режим двигуна АД;
KM1 розімкнений, *KM2* замкнений – режим динамічного гальмування АД

Рисунок 2 – Схема динамічного гальмування АД при незалежному збудженні:

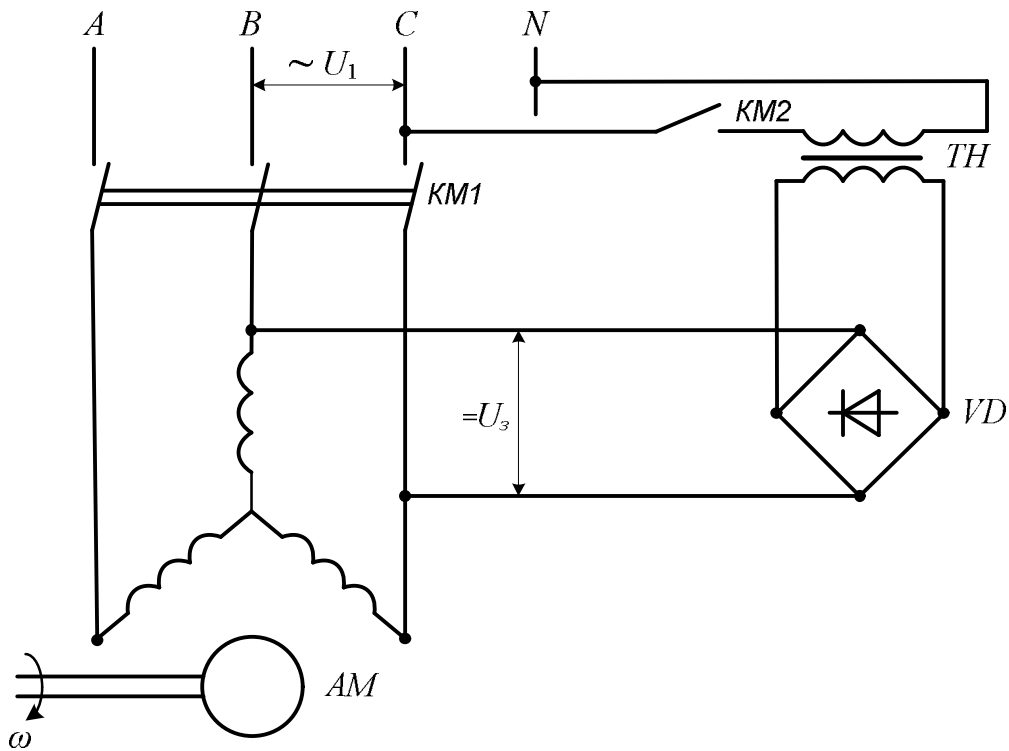


Рисунок 3 – Схема живлення обмотки статора АД при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням

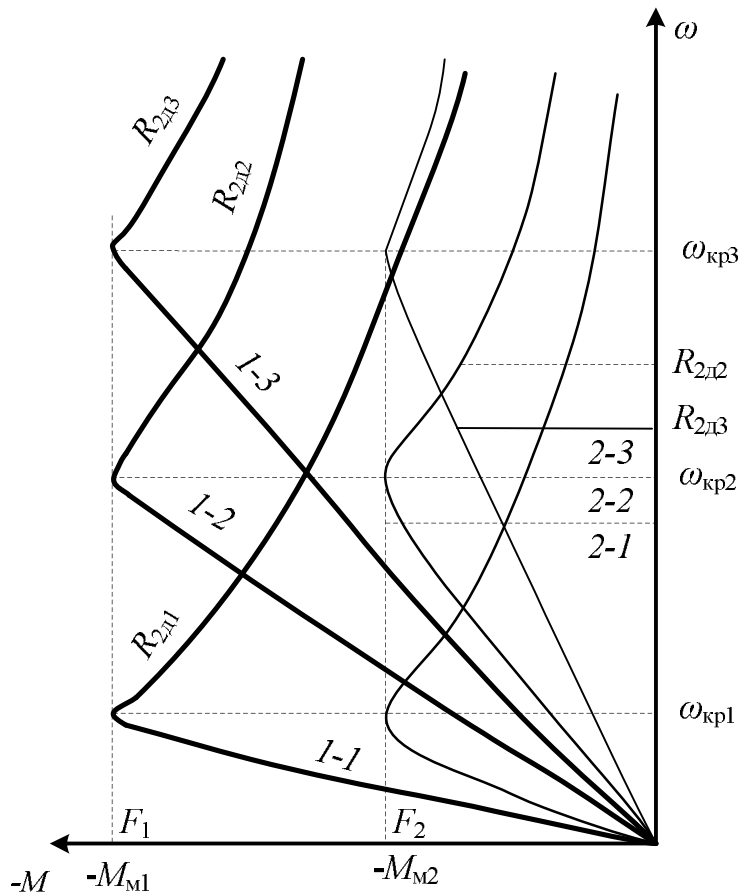


Рисунок 4 – Механічні характеристики динамічного гальмування АД при незалежному збудженні

Величина максимального моменту гальмування M_m не залежить від величини опору якірного кола, а залежить від величини МРС статора (M_{m1} для F_1 і M_{m2} для F_2). Величина критичної швидкості (критичного ковзання), навпаки, однакова для одного й того ж значення активного опору ротора незалежно від величини МРС статора.

Схожість механічних характеристик гальмівного та двигунного режимів є тільки зовнішньою. Кількісні ж розбіжності їх суттєві. Так при одному і тому ж активному опорі ротора критичне ковзання у режимі двигуна значно більше критичного ковзання динамічного гальмування, оскільки у режимі динамічного гальмування змінний струм обмотки статора відсутній, значить відсутній і індуктивний опір X_1 , а є тільки індуктивний опір намагнічування X_μ , який $X_1 \gg X_\mu$. Тоді

$$S_{к(двиг)} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}, \text{ а } S_{м(д.г.)} = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2}, S_{к(двиг)} > S_{м(д.г.)}.$$

Друга відмінність: у режимі двигуна МРС АД обертальна, а в гальмівному – МРС нерухома.

Третя відмінність: струм статора у режимі двигуна змінний, він є функцією ковзання, а при динамічному гальмуванні при незалежному збудженні струм статора постійний.

Четверта відмінність: у режимі двигуна всі характеристики починаються з точки максимальної швидкості режиму двигуна – синхронної ($\omega = \omega_0, S = 0$), а у гальмівному – з точки мінімальної швидкості ($\omega = 0, S = 1$).

Динамічне гальмування з незалежним збудженням широко використовується в електроприводах (особливо у вантажопідйомних машинах).

Динамічне гальмування при самозбудженні

Це гальмування реалізується наступним чином: до кола статора підключається конденсатор, рисунок 5. Тому це гальмування ще називають конденсаторним. Використовується таке гальмування головним чином для АД з короткозамкненим ротором.

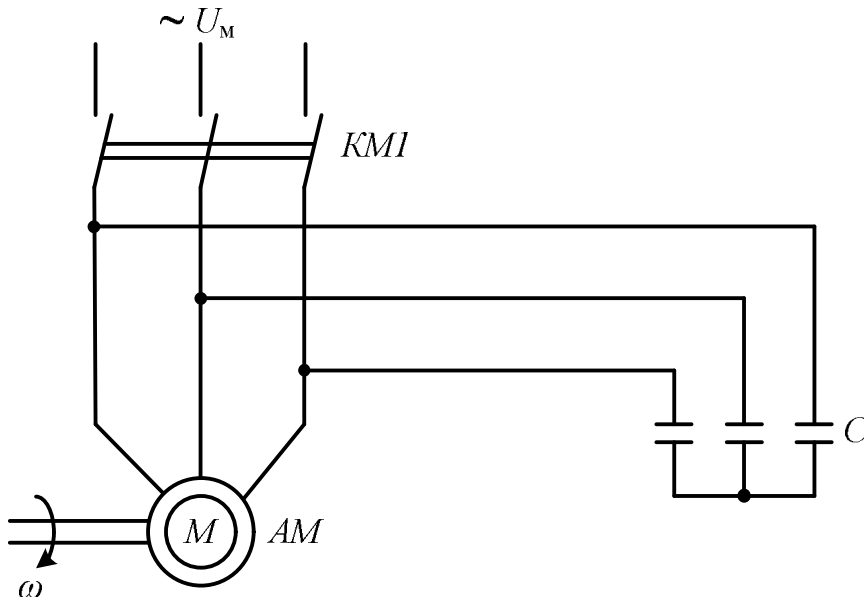


Рисунок 5 – Схема динамічного гальмування АД при самозбудженні

Для реалізації конденсаторного гальмування у відповідності до схеми, досить відключити лінійний контактор *КМ1*. В цьому випадку машина працює самозбудженим асинхронним генератором. Поштовх для самозбудження дає ЕРС, яка індуктується в обмотках статора за рахунок обертання ротора (під дією накопиченої механізмом потенційної або кінетичної енергії), що має незначну ЕРС залишкового намагнічування. Незначна ЕРС залишкових процесів, що прикладена до конденсатора, обумовлює незначний струм статорного кола.

Цей струм створює незначне обертальне магнітне поле, яке збільшує ЕРС статора, збільшується напруга на конденсаторі, збільшується струм, збільшується гальмівний момент. У подальшому цей процес нарощується і йде до тих

під, поки напруга на затискачах двигуна і на затискачах конденсатора не зрівняється.

Механічні характеристики динамічного гальмування із самозбудженням (рисунок 6) показані для трьох значень ємності конденсатора.

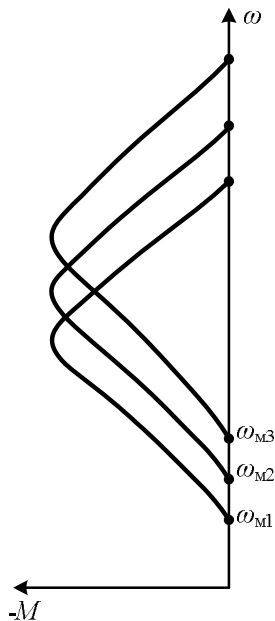


Рисунок 6 – Механічні характеристики динамічного гальмування АД при самозбудженні

Зі зменшенням ємності максимум гальмівного моменту зміщується у зону більших швидкостей і збільшується його абсолютне значення. Вадами такого гальмування є наявність так званої, мертвої зони у межах якої гальмівний момент не створюється. Зі зменшенням ємності критична швидкість ω_M цієї зони нечутливості збільшується. Величина критичної швидкості досить значна і сягає десь $\omega_M \approx 0,3\omega_H$.

Крім того, для зменшення зони нечутливості необхідно збільшувати ємність, що призводить до збільшення вартості.

Перевагою динамічного гальмування із самозбудженням є відсутність потреби в джерелі живлення при гальмуванні.

Аналіз роботи асинхронного двигуна в режимі роботи динамічного гальмування доцільно провести, вважаючи, що статор живиться не постійним, а еквівалентним трифазним змінним струмом $I_{екв}$. Ця заміна передбачає рівність магніторушійних сил (МРС), створених постійним струмом і еквівалентним змінним струмом. Амплітуда МРС, створена змінним струмом дорівнює

$$F = \frac{3\sqrt{2}}{2} \cdot I_{екв} \cdot w_1, \quad (1)$$

де w_1 – число послідовно з'єднаних витків фази статора.

Магніторушійна сила, створена постійним струмом, пропорційна постійному струму, числу витків фази статора і залежить від схеми з'єднання. Наприклад, при з'єднанні статора в «зірку» і проходженні постійного струму тільки по двом фазам (схема 1, таблиця 2) МРС постійного струму, визначена геометричною сумою МРС двох фаз, дорівнює

$$F_{II} = \sqrt{3} \cdot I_{II} \cdot w_1. \quad (2)$$

Виходячи з рівності $F_{II} = F$, можна визначити значення еквівалентного змінного струму для даної схеми з'єднання обмоток статора

$$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_{II}. \quad (3)$$

Електромагнітний момент, який розвиває електродвигун, визначається за виразом

$$M = \frac{3I_2'^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S} = \frac{3I_{\text{екв}}^2 \cdot X_{\mu}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \left[\left(\frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_{\mu} + X_2')^2 \right] \cdot S}. \quad (4)$$

Якщо припустити в першому наближенні машину ненасиченою, то в (4) $X_{\mu} = \text{const}$ і момент M буде функцією ковзання S , так як інші параметри приймаються постійними, тому після диференціювання рівняння (4) можна отримати максимальне значення ковзання

$$S_{\text{м(д.г.)}} = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'}, \quad (5)$$

при якому момент має максимум

$$M_{\text{м(д.г.)}} = \frac{3I_{\text{екв}}^2 \cdot X_{\mu}^2}{2\omega_0 \cdot (X_{\mu} + X_2')}. \quad (6)$$

Так як в реальних умовах двигун при роботі в режимі динамічного гальмування з малими ковзаннями насичена, а при великих не насичена, то зміна постійного струму спричиняє сильні зміни моменту в області великих ковзань і відносно невеликі зміни в області малих ковзань.

З достатньою для інженерних розрахунків точністю для розрахунку максимального моменту і відповідного йому максимального ковзання при динамічному гальмуванні асинхронного двигуна користуються кривими (рисунок 7), для різних значень відносного еквівалентного струму

$$i_{\text{екв}} = \frac{I_{\text{екв}}}{I_0} \quad (7)$$

дані залежності величини D_M

$$D_M = M_M \cdot \frac{\omega_0}{3 \cdot I_0 \cdot U_{1\phi}}, \quad (8)$$

яка пропорційна моменту, від величини A_M

$$A_M = S_M \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_0 \cdot R'_2}, \quad (9)$$

яка пропорційна ковзанню.

Користуючись рисунком 7 визначають величини A_M та D_M наступним чином. Значення еквівалентного струму у відносних одиницях слід відкласти по вертикальній осі і провести горизонтальну лінію до перетину з лінією еквівалентного струму в точці a . З точки a опустити перпендикуляр на ось D_M . Записати значення D_M . Перпендикуляр з точки a перетинає лінію A_M в точці b . З точки b провести горизонтальну лінію на ось A_M . Записати значення A_M .

Механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі електродинамічного гальмування розраховують за рівнянням, отриманим після перетворення (4)

$$M = \frac{2M_M}{\frac{S}{S_M} + \frac{S_M}{S}}, \quad (10)$$

де M_M – максимальний момент при динамічному гальмуванні, Н·м;

S_M – максимальне ковзання при динамічному гальмуванні, в.о.

4 Приклад розрахунку

На підприємстві в рамках задачі підвищення продуктивності обладнання вирішено застосувати динамічне гальмування для швидкої зупинки асинхронного електропривода. Визначити необхідний постійний струм для динамічного гальмування та побудувати механічну характеристику при динамічному гальмуванні.

4.1 Для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором запишемо паспортні дані і параметри схеми заміщення Г-подібної схеми заміщення АД з короткозамкненим ротором (таблиця 7).

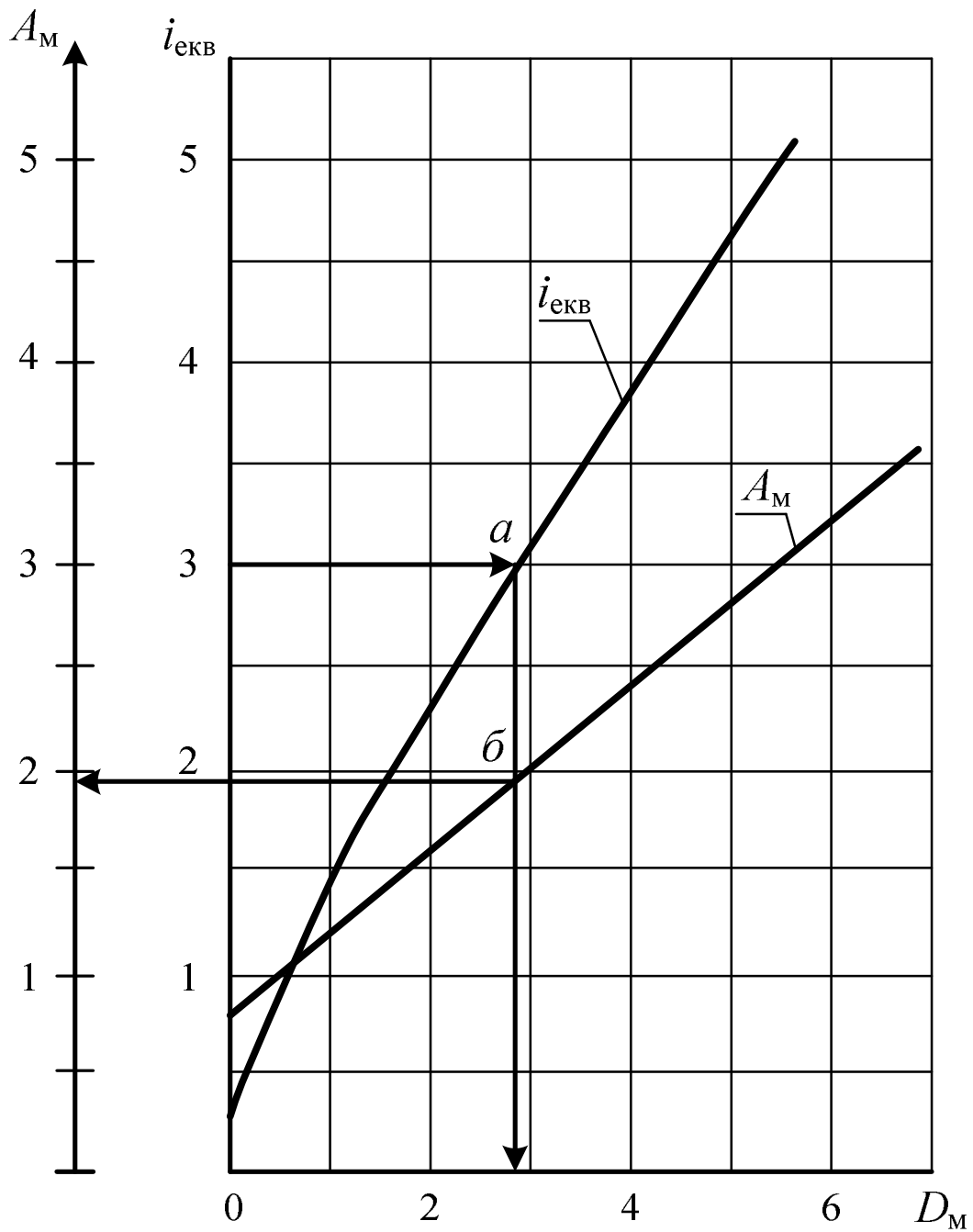


Рисунок 7 – Криві для розрахунку максимального моменту і відповідного ковзання при динамічному гальмуванні асинхронного електродвигуна

Таблиця 7 – Паспортні дані і параметри схеми заміщення Г-подібної схеми заміщення АД з короткозамкненим ротором (таблиця 1)

Варіант	Типорозмір електродвигуна	P_H , кВт	I_H , А	S_H , в.о.	ω_0 , рад/с	X_μ , Ом	μ_k , в.о.	S_k , в.о.	R'_2 , Ом	i_{EKB} , в.о.	μ_{II} , в.о.	μ_{min} , в.о.
30	4A180M6Y3	18,5	36,6	0,024	104,7	17,4	2,0	0,135	0,156	4,5	1,2	1,0

В таблиці 7 позначено:

P_H – номінальна потужність електродвигуна, кВт;

I_H – номінальний струм електродвигуна, А;

S_H – номінальне ковзання, в.о.;

ω_0 – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля, рад/с;

X_μ – індуктивний опір намагнічування, Ом;

μ_K – кратність максимального моменту, в.о.;

S_K – критичне ковзання, в.о.;

R'_2 – приведений активний опір ротора, Ом;

$i_{екв}$ – кратність еквівалентного струму, в.о.;

$\mu_{п}$ – кратність пускового моменту, в.о.;

$\mu_{мін}$ – кратність мінімального моменту, в.о.

4.2 Накреслити схему підключення постійного струму до обмотки статора електродвигуна при схемі з'єднання «зірка» і діаграму магніторушійних сил (МРС) (рисунок 8).

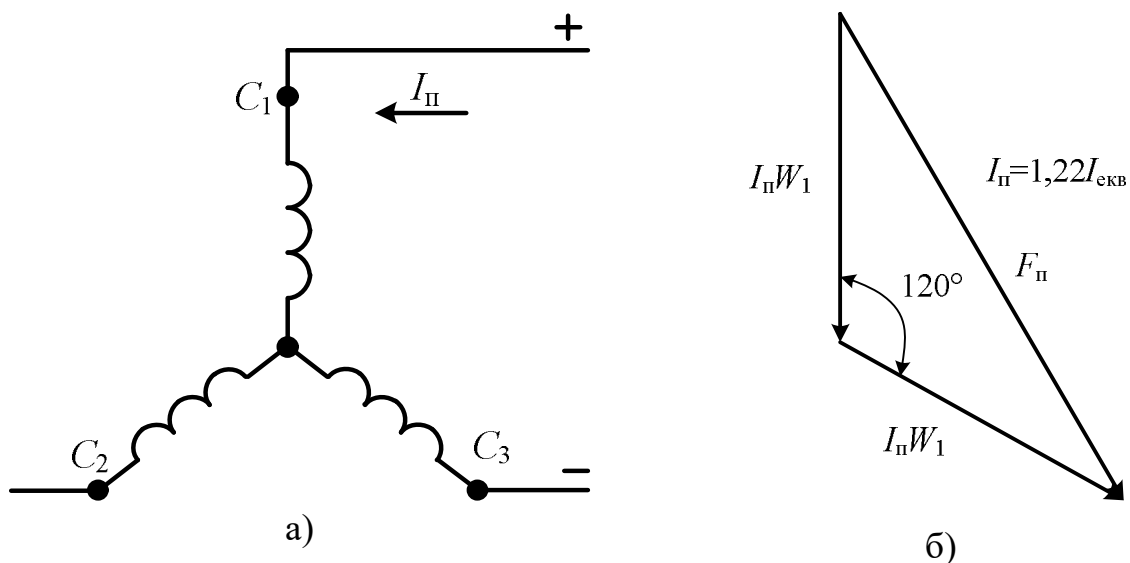


Рисунок 8 – Схема підключення постійного струму до обмотки статора двигуна при схемі з'єднання «зірка» (а) і діаграма магніторушійних сил (МРС) (б)

4.3 Визначити струм холостого ходу електродвигуна в іменованих і відносних одиницях, якщо відомі параметри Г-подібної схеми заміщення електродвигуна.

Визначаємо струм холостого ходу електродвигуна в іменованих одиницях за формулою

$$I_0 = \frac{U_{1\phi}}{X_\mu},$$

де $U_{1\phi}$ – фазна напруга, В;

X_{μ} – індуктивний опір намагнічування, Ом. Згідно завдання $X_{\mu} = 17,4$ Ом.

$$I_0 = \frac{220}{17,4} = 12,64 \text{ А.}$$

Визначаємо струм холостого ходу електродвигуна у відносних одиницях за формулою

$$i_0 = \frac{I_0}{I_H},$$

де I_H – номінальний струм електродвигуна, А. Згідно завдання $I_H = 36,6$ А.

$$i_0 = \frac{12,64}{36,6} = 0,35 \text{ в.о.}$$

4.4 Визначити величину еквівалентного струму і постійного струму від випрямляча при динамічному гальмуванні.

Визначаємо еквівалентний струм за формулою

$$I_{\text{екв}} = i_{\text{екв}} \cdot I_0,$$

де $i_{\text{екв}}$ – кратність еквівалентного струму, в.о. Згідно завдання $i_{\text{екв}} = 4,5$ в.о.

$$I_{\text{екв}} = 4,5 \cdot 12,64 = 56,88 \text{ А.}$$

Постійний струм, що протікає по обмоткам електродвигуна при динамічному гальмуванні дорівнює (таблиця 2)

$$I_{\text{пост}} = 1,22 \cdot I_{\text{екв}};$$

$$I_{\text{пост}} = 1,22 \cdot 56,88 = 69,39 \text{ А.}$$

4.5 Визначити значення максимального моменту і максимального ковзання при динамічному гальмуванні.

Значення максимального моменту та максимального ковзання при динамічному гальмуванні знаходимо за наступними формулами

$$M_M = \frac{3 \cdot I_0 \cdot U_{1\phi}}{\omega_0} \cdot D_M;$$

$$S_M = \frac{I_0 \cdot R'_2}{U_{1\phi}} \cdot A_M,$$

де D_M – величина, пропорційна максимальному моменту;
 A_M – величина, пропорційна максимальному ковзанню;
 ω_0 – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля, рад/с. Згідно завдання $\omega_0 = 104,7$ рад/с;
 R'_2 – приведений активний опір ротора, Ом. Згідно завдання $R'_2 = 0,156$ Ом.
 Користуючись рисунком 7 визначаємо величини A_M та D_M :

$$D_M = 4,8; \quad A_M = 2,75.$$

Отже,

$$M_M = \frac{3 \cdot 12,64 \cdot 220}{104,7} \cdot 4,8 = 382,46 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$S_M = \frac{12,64 \cdot 0,156}{220} \cdot 2,75 = 0,025 \text{ в.о.}$$

4.6 Визначити значення моментів динамічного гальмування для різних значень ковзання і побудувати графік механічної характеристики при динамічному гальмуванні.

Задаючи значення ковзання $S_{д.г.}$ від 0 до 1, визначаємо момент при динамічному гальмуванні за спрощеною формулою Клосса

$$M_{д.г.} = \frac{2M_M}{\frac{S_i}{S_M} + \frac{S_M}{S_i}}.$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 8.

Таблиця 8 – Результати розрахунків механічної характеристики асинхронного електродвигуна при динамічному гальмуванні

Розрахункова формула	Параметри при ковзанні						
	$0,5S_M$	S_M	$2S_M$	$4S_M$	$8S_M$	$16S_M$	1
S_i / S_M	0,5	1	2	4	8	16	40
S_M / S_i	2	1	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,025
$\frac{S_i}{S_M} + \frac{S_M}{S_i}$	2,5	2	2,5	4,25	8,125	16,0625	40,025
$M = \frac{2M_M}{\frac{S_i}{S_M} + \frac{S_M}{S_i}}$	305,97	382,46	305,97	179,98	94,14	47,62	19,11

За результатами таблиці 8 будуємо залежність $\omega_{д.г.}(S_{д.г.}) = f(M_{д.г.})$ (рисунок 9). На цьому ж рисунку 9 зображуємо механічну характеристику електродвигуна в двигунному режимі $\omega_{д.}(S_{д.}) = f(M_{д.})$. Перехід від ковзання S до кутової швидкості ω для будь-якої точки МХ розраховуємо за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i).$$

Побудову графіка механічної характеристики електродвигуна в двигунному режимі виконуємо за п'ятьма точками.

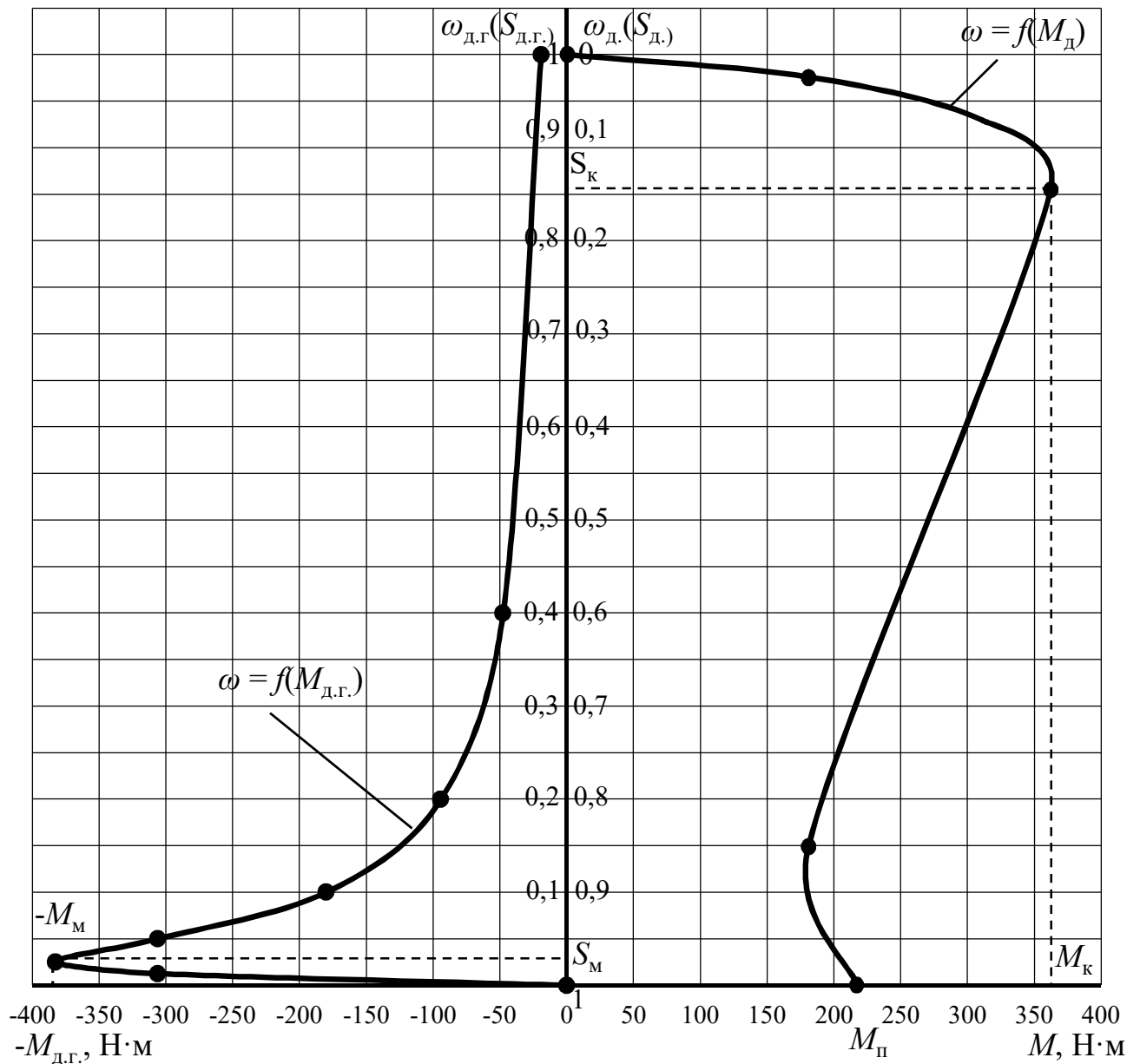


Рисунок 9 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна в режимі двигуна і в режимі динамічного гальмування

Перша точка – точка ідеального холостого ходу (синхронний режим) з координатами $M_{\text{д}} = 0$; $S = 0$; $\omega = \omega_0$.

Друга точка – точка номінального режиму з координатами: $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$, $S = S_{\text{н}}$; $\omega = \omega_{\text{н}}$.

Визначаємо номінальний момент електродвигуна

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт;

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{н}}),$$

де $S_{\text{н}}$ – номінальне ковзання, в.о. Згідно паспортних даних $S_{\text{н}} = 0,024$ в.о.

$$\omega_{\text{н}} = 104,7 \cdot (1 - 0,024) = 102,19 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{н}} = \frac{18,5 \cdot 10^3}{102,19} = 181,04 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Третя точка – точка максимального моменту (критичний режим) з координатами $M_{\text{дв}} = M_{\text{к}}$, $S = S_{\text{к}}$. Згідно паспортних даних $S_{\text{к}} = 0,135$ в.о.

Визначаємо критичний (максимальний) момент електродвигуна

$$M_{\text{к}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{к}};$$

$$M_{\text{к}} = 181,04 \cdot 2,0 = 362,08 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Четверта точка – точка мінімального моменту з координатами :

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{мін}}, S_{\text{мін}} = 0,8 \dots 0,85. \text{ Приймаємо } S_{\text{мін}} = 0,85.$$

Визначаємо мінімальний момент електродвигуна

$$M_{\text{мін}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{мін}},$$

де $\mu_{\text{мін}}$ – кратність мінімального моменту двигуна, в.о. Згідно паспортних даних $\mu_{\text{мін}} = 1,0$.

$$M_{\text{мін}} = 181,04 \cdot 1,0 = 181,04 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

П'ята точка – точка короткого замикання (режим початкового пуску) з координатами: $M_{\text{дв}} = M_{\text{п}}, S_{\text{п}} = 1$.

Визначаємо пусковий момент електродвигуна

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{п}},$$

де $\mu_{\text{п}}$ – кратність пускового моменту двигуна, в.о. Згідно паспортних даних $\mu_{\text{п}} = 1,2$.

$$M_{\text{п}} = 181,04 \cdot 1,2 = 217,25 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Схему підключення постійного струму до обмотки статора електродвигуна та діаграму магніторушійних сил.
- 4 Механічні характеристики електродвигуна в двигунному режимі і в режимі динамічного гальмування.
- 5 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 В яких гальмівних режимах може працювати АД?
- 2 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна?
- 3 Як визначається ковзання АД в загальному вигляді?
- 4 Яким чином виконується режим динамічного гальмування?
- 5 Як визначається струм холостого ходу асинхронного електродвигуна при динамічному гальмуванні?
- 6 Яке значення постійного струму протікає по обмоткам електродвигуна при динамічному гальмуванні?
- 7 Як визначити максимальний момент при динамічному гальмуванні?
- 8 За якими характерними точками будується механічна характеристика асинхронного електродвигуна?
- 9 Як залежить момент асинхронного електродвигуна від підведеної до нього напруги?

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку електромеханічних і механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором для різних режимів роботи.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок електромеханічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом ротора і за струмом статора [1, с. 84-94; 3, 74-76; 4, с. 79-83; 11, с. 125-128; 20].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: розрахунок природної та штучних механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором для різних режимів роботи [1, с. 79-83; 3, 76-82; 4, с. 83-93; 11, с. 128-136; 20].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для заданого електродвигуна з фазним ротором розрахувати та побудувати природні електромеханічні характеристики за струмом ротора $\omega = f_1(I_2')$ та за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$.

2.2 Для заданого електродвигуна з фазним ротором розрахувати та побудувати природну механічну характеристику $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$.

2.3 Розрахувати та побудувати штучну механічну характеристику $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при введенні в коло ротора активного опору $\dot{R}_{2\text{д}} = 0,1$ при номінальній напрузі і номінальній частоті мережі.

2.4 Розрахувати та побудувати штучну механічну характеристику $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі на 10 % при $R_{2\text{д}} = 0$, $f_1 = 50$ Гц.

3 Загальні відомості і рекомендації

Робота електропривода визначається ефективністю функціонування електродвигуна, тому важливо знати закономірності електромеханічного перетворення в процесі роботи електропривода електричної енергії в механічну і навпаки. Знання фізичних процесів, що відбуваються в електричній машині в двигунному і гальмівних режимах, допоможе їх математичному опису, визначенню шляхів керування електромеханічними процесами перетворення енергії і розрахунку характеристик електропривода.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електро-двигуна	P_H , кВт	Енергетичні показники		I_{2H} , А	E_{2K} , В	Механічна характеристика		
			η_H , %	$\cos \varphi_H$, в.о.			μ_K , в.о.	S_H , %	S_K , %
1	4AK160S4Y3	11,0	86,5	0,86	22	305	3,0	4,4	33,0
2	4AK160M4Y3	14,0	88,5	0,87	29	300	3,5	3,7	32,1
3	4AK180M4Y3	18,5	89,0	0,88	38	295	4,0	2,9	31,1
4	4AK200M4Y3	22,0	90,0	0,87	45	340	4,0	2,5	22,0
5	4AK200L4Y3	30,0	90,5	0,87	55	350	4,0	2,5	22,0
6	4AK225M4Y3	37,0	90,0	0,87	160	160	3,0	3,5	20,0
7	4AK250SA4Y3	45,0	91,5	0,88	170	230	3,0	3,0	20,5
8	4AK250SB4Y3	55,0	90,5	0,90	170	200	3,0	2,3	19,6
9	4AK250M4Y3	71,0	91,5	0,86	170	250	3,0	2,5	19,5
10	4AK160M6Y3	10,0	84,5	0,76	20	310	3,8	4,3	27,1
11	4AK180M6Y3	13,0	85,5	0,80	25	325	4,0	4,4	29,1
12	4AK200M6Y3	18,5	88,0	0,81	35	360	3,5	3,5	27,5
13	4AK200L6Y3	22,0	88,0	0,80	45	330	3,5	3,5	21,0
14	4AK225M6Y3	30,0	89,0	0,85	150	140	2,5	3,5	19,5
15	4AK250S6Y3	37,0	89,0	0,84	165	150	2,5	3,5	18,0
16	4AK250M6Y3	45,0	90,5	0,87	160	180	2,5	2,5	17,0
17	4AK160S8Y3	5,5	80,0	0,70	14	300	2,5	6,4	29,0
18	4AK160M8Y3	7,1	82,0	0,70	6	290	3,0	5,5	23,2
19	4AK180M8Y3	11,0	85,5	0,72	25	270	3,5	4,4	22,7
20	4AK200M8Y3	15,0	86,0	0,70	28	360	3,0	3,5	23,0
21	4AK200L8Y3	18,5	86,0	0,73	40	300	3,0	3,5	21,5
22	4AK225M8Y3	22,0	87,0	0,82	140	102	2,2	4,5	19,5
23	4AK250S8Y3	30,0	88,5	0,81	155	125	2,2	4,0	20,0
24	4AK250M8Y3	37,0	89,0	0,80	155	148	2,2	3,5	18,5
25	4АНК160М4У3	17,0	88,0	0,87	34	315	3,5	4,1	32,3

Продовження таблиці 1

Варіант	Тип електро-двигуна	P_n , кВт	Параметри схеми заміщення, в.о.			
			\ddot{R}_1 , в.о.	\ddot{X}_1 , в.о.	\ddot{R}'_2 , в.о.	\ddot{X}'_2 , в.о.
1	4AK160S4Y3	11,0	0,038	0,068	0,051	0,086
2	4AK160M4Y3	14,0	0,032	0,060	0,042	0,078
3	4AK180M4Y3	18,5	0,022	0,042	0,034	0,063
4	4AK200M4Y3	22,0	0,024	0,050	0,026	0,075
5	4AK200L4Y3	30,0	0,026	0,057	0,030	0,087
6	4AK225M4Y3	37,0	0,023	0,061	0,027	0,069
7	4AK250SA4Y3	45,0	0,020	0,067	0,030	0,080
8	4AK250SB4Y3	55,0	0,017	0,061	0,025	0,073
9	4AK250M4Y3	71,0	0,015	0,053	0,021	0,064
10	4AK160M6Y3	10,0	0,043	0,071	0,058	0,13
11	4AK180M6Y3	13,0	0,035	0,065	0,057	0,11
12	4AK200M6Y3	18,5	0,030	0,060	0,038	0,078
13	4AK200L6Y3	22,0	0,032	0,066	0,041	0,089
14	4AK225M6Y3	30,0	0,029	0,073	0,030	0,091
15	4AK250S6Y3	37,0	0,026	0,063	0,024	0,078
16	4AK250M6Y3	45,0	0,029	0,062	0,024	0,092
17	4AK160S8Y3	5,5	0,060	0,112	0,094	0,175
18	4AK160M8Y3	7,1	0,053	0,11	0,079	0,208
19	4AK180M8Y3	11,0	0,041	0,086	0,062	0,167
20	4AK200M8Y3	15,0	0,040	0,081	0,048	0,12
21	4AK200L8Y3	18,5	0,038	0,089	0,046	0,12
22	4AK225M8Y3	22,0	0,039	0,100	0,043	0,13
23	4AK250S8Y3	30,0	0,033	0,081	0,034	0,10
24	4AK250M8Y3	37,0	0,031	0,078	0,031	0,10
25	4AHK160M4Y3	17,0	0,035	0,067	0,047	0,087

Асинхронний двигун є універсальним перетворювачем енергії, в якому відбувається перетворення напруги статора U_1 в напругу ротора U_2 , частоти живлення f_1 в частоту струму ротора f_2 , електричної потужності P_1 , що споживається з мережі, в механічну потужність P_2 , що розвивається електродвигуном.

При підключенні обмотки статора двигуна до мережі трифазного струму виникає обертове магнітне поле, кутова швидкість якого ω_0 , називається синхронною і знаходиться за формулою

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (1)$$

де f_1 – частота змінного струму промислової частоти, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – число пар полюсів двигуна, яке визначається з паспортних даних.

Різниця між синхронною кутовою швидкістю і поточним значенням кутової швидкості ротора, віднесена до синхронної швидкості ω_0 , називається ковзанням

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (2)$$

Для двигунного режиму $S = 1..0$ і потужність на валу визначається

$$P_2 = M \cdot \omega = P_{ем} \cdot (1 - S), \quad (3)$$

де $P_{ем} = M \cdot \omega_0$ – електромагнітна потужність, Вт.

Різниця

$$P_{ем} - P_2 = P_{ем} \cdot S = \Delta P \quad (4)$$

представляє втрати потужності при електромеханічному перетворенні енергії, які пропорційні ковзанню.

Для зручності розгляду процесів, що відбуваються, і спрощення рівнянь, параметри обмотки ротора зводяться до обмотки статора. Смісл зведення складається в умовній заміні дійсної роторної обмотки фіктивною, яка має теж число фаз і витків, і той же обмотувальний коефіцієнт, що і статорна обмотка. В позначеннях коефіцієнти з індексом 1 відносяться до обмотки статора (первинного кола), а з індексом 2 – до обмотки ротора (вторинного кола).

На практиці у більшості двигунів кількість фаз статора і ротора однакова, тому формули зведення матимуть вигляд:

– приведений до статора струм ротора

$$I'_2 = \frac{I_2}{K_E}, \quad (5)$$

де I_2 – дійсний струм ротора, А;

K_E – коефіцієнт трансформації електрорушійної сили (ЕРС).

$$K_E = \frac{E_1}{E_2}, \quad (6)$$

де E_1, E_2 – відповідно ЕРС обмоток статора і ротора, В;

– зведені до обмотки статора опори ротора дорівнюють

$$R'_2 = R_2 \cdot K_E^2, \quad X'_2 = X_2 \cdot K_E^2, \quad (7)$$

де R_2, X_2 – відповідно дійсні активний та індуктивний опори фази ротора, Ом.

Коефіцієнт K_E можна визначити за паспортними даними двигуна

$$K_E \approx 0,95 \cdot \frac{U_{\text{лн}}}{E_{2\text{к}}}, \quad (8)$$

де 0,95 – коефіцієнт, що враховує 5 % втрату напруги в обмотці статора;

$U_{\text{лн}}$ – номінальна лінійна напруга статора, $U_{\text{лн}} = 380$ В;

$E_{2\text{к}}$ – ЕРС між кільцями нерухомого фазного ротора, В.

Із визначення коефіцієнта K_E відомо, що зведена до обмотки статора ЕРС ротора дорівнює

$$E'_2 = E_2 \cdot K_E = E_1, \quad (9)$$

а коефіцієнт трансформації струму

$$K_T = \frac{I_2}{I'_2}. \quad (10)$$

Опори короткого замикання двигуна в загальному випадку можна визначити за формулами

$$R_{\text{к}} = R_1 + R'_2, \quad X_{\text{к}} = X_1 + X'_2. \quad (11)$$

Якщо обмотки двигуна з'єднані в трикутник, то його слід замінити схемою еквівалентної зірки, для якої опори приймають рівними 1/3 фактичних опорів фаз статора і ротора.

За паспортними даними номінальний струм статора двигуна розраховується за формулою

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}}. \quad (12)$$

Електро механічна характеристика визначає залежність між кутовою швидкістю ротора ω (або ковзанням) і струмом статора I_1 або струмом ротора I_2' .

Електро механічну характеристику асинхронного двигуна за струмом ротора розраховують за формулою

$$I_2'(S) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (13)$$

В режимі ідеального холостого ходу через обмотку статора протікає тільки струм намагнічування I_μ , який створює магнітний потік в статорі, тому струм статора визначається як геометричний добуток приведенного струму ротора і намагнічуючого струму

$$\dot{I}_1^2 = \dot{I}_1'^2 + \dot{I}_\mu^2. \quad (14)$$

Механічною характеристикою асинхронного двигуна називають залежність електромагнітного моменту M від ковзання, тобто $M = f(S)$ або $\omega = f(M)$. Електромагнітний момент визначається за виразом

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (15)$$

Ковзання, при якому момент двигуна буде максимальним, називається критичним і визначається виразом

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (16)$$

Знак «+» відповідає режиму двигуна, а знак «-» – генераторному режиму з рекуперацією енергії в мережу. Якщо підставити в рівняння (15) значення S_k , то отримаємо вираз критичного моменту

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \cdot \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (17)$$

З формули (17) випливає, що M_k в генераторному режимі буде від'ємним і за абсолютним значенням в 1,5...3 рази більше критичного моменту в режимі двигуна.

Поділивши рівняння (15) на рівняння (17), після відповідних перетворень отримаємо рівняння механічної характеристики, що застосовується для двигунів малої потужності (уточнена формула Клосса)

$$M = \frac{2M_k \cdot (1 + aS_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2aS_k}, \quad (18)$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до активного опору фази обмотки ротора, зведеного до обмотки статора, в.о.;

R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R'_2 – зведений активний опір кола ротора, Ом;

S – поточне ковзання, в.о.;

S_k – критичне значення ковзання, в.о.

Для двигунів середньої та великої потужності, вважаючи $R_1 \approx 0$, механічну характеристику будують за спрощеною формулою Клосса, яка дозволяє використовувати лише паспортні дані двигуна

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (19)$$

Критичне ковзання можна знайти за формулою

$$S_k = S_n \cdot \left(1 + \sqrt{\mu_k^2 - 1}\right), \quad (20)$$

де μ_k – перевантажувальна здатність двигуна, в.о., $\mu_k = M_k / M_n$.

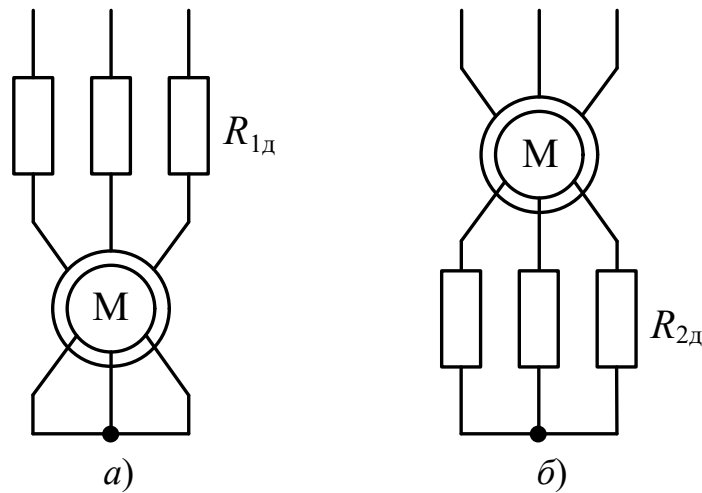
Штучні характеристики асинхронних електродвигунів ***Реостатні механічні характеристики***

Цей метод застосовується для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором шляхом включення резисторів в коло статора, а для асинхронних двигунів з фазним ротором – включенням резисторів в коло ротора. Схеми включення асинхронних електродвигунів представлені на рисунку 1.

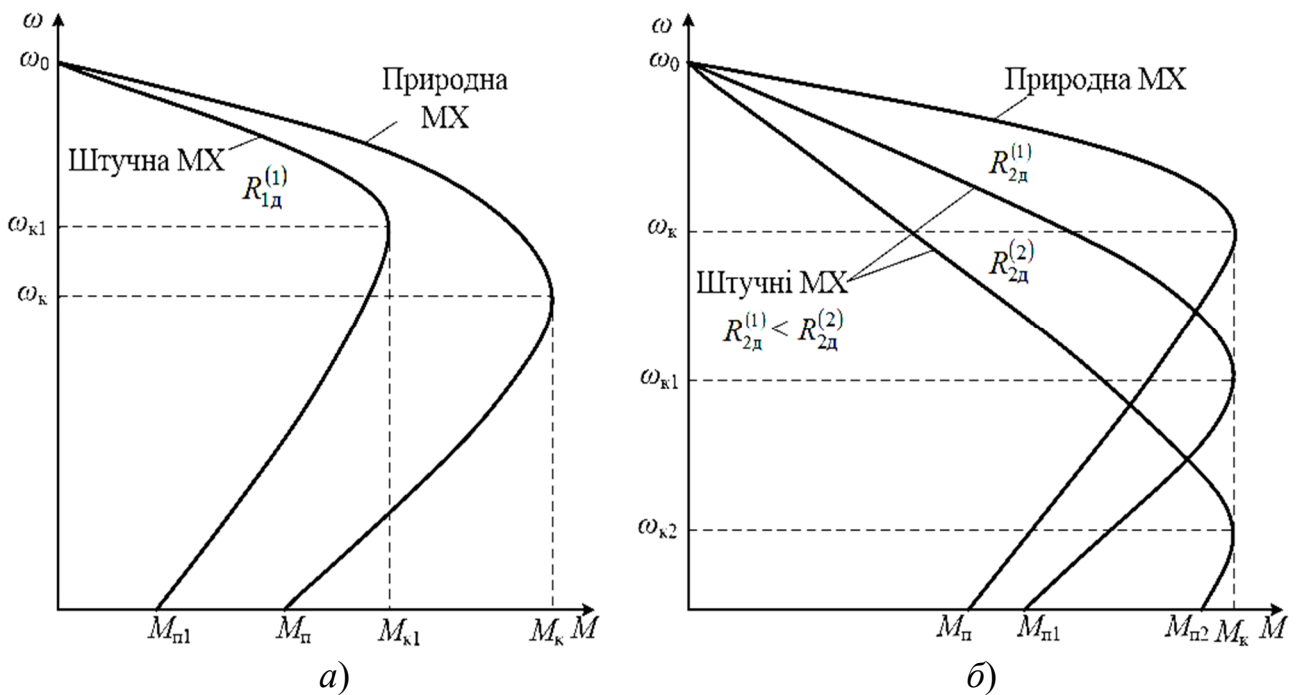
Зміну опору роторного кола здійснюють в асинхронних двигунах з фазним ротором, наприклад АИРФ, які є електричною модифікацією двигунів загального використання серії АИР. Двигуни з фазним ротором використовують в

приводах з важкими умовами пуску або тих, що потребують регулювання частоти обертання в невеликому діапазоні.

Загальний вигляд механічних характеристика асинхронного двигуна при зміні опорів в колі статора і ротора наведений на рисунку 2.



а – ЕД з короткозамкненим ротором; б – ЕД з фазним ротором
Рисунок 1 – Схеми включення додаткових резисторів



а – з короткозамкненим ротором; б – з фазним ротором

Рисунок 2 – Реостатні механічні характеристики асинхронних двигунів

При введенні резисторів в коло статора знижуються величини критичного моменту і критичного ковзання двигуна, оскільки ці параметри залежать від опору кола статора.

При введенні додаткових резисторів в коло ротора згідно рівняння (16) критичне ковзання двигуна збільшується, а критичний момент M_k двигуна (17)

не змінюється, оскільки не залежить від опору кола ротора. Введення додаткового опору в коло ротора призводить до зменшення пускового струму, пусковий момент збільшується, доки критичне ковзання досягне одиниці. Подальше збільшення опору роторного кола призводить до зменшення пускового моменту. Синхронна частота обертання також залишається без змін.

Механічні характеристики при зміні напруги живлення

Зниження напруги живлення поєднано із значним зменшенням критичного моменту (вираз 21) при збереженні постійним критичного ковзання (критичної кутової швидкості).

$$M_{к1} = M_{к} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{н}} \right)^2. \quad (21)$$

Загальний вигляд механічних характеристик асинхронного двигуна при зміні напруги живлення на статорі наведений на рисунку 3.

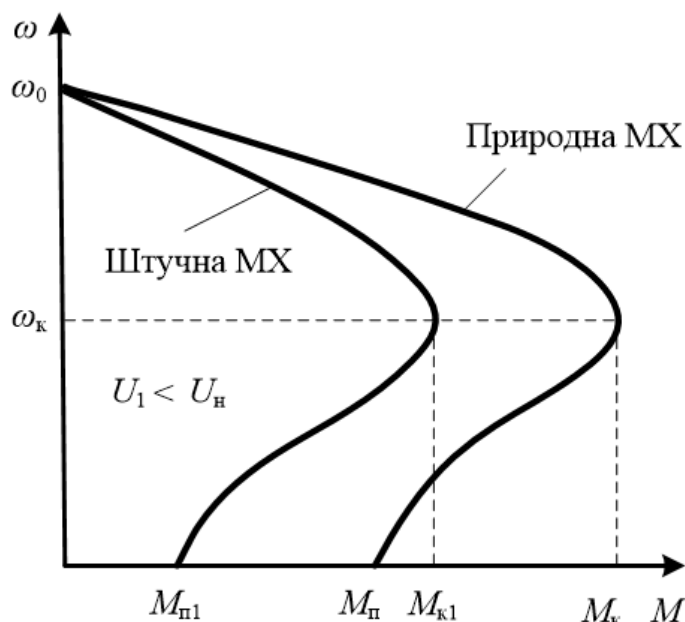


Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронних двигунів при зниженні напруги живлення на статорі

4 Приклад розрахунку

4.1 Для заданого електродвигуна типу 4AK160S6Y3 з фазним ротором розрахувати природні електромеханічні характеристики за струмом ротора і струмом статора. Технічна характеристика двигуна приведена в таблиці 2.

Електромеханічну характеристику асинхронного двигуна за струмом ротора розраховуємо згідно схеми заміщення за формулою

$$I'_2(s) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}},$$

де U_1 – діюче значення фазної напруги, В;

X_1, R_1 – відповідно індуктивний і активний опір обмотки фази статора, Ом;

I'_2, R'_2, X'_2 – відповідно зведені до обмотки статора струм ротора, А; активний і індуктивний опори фази ротора, Ом;

S – ковзання електродвигуна, в.о.

Таблиця 2 - Параметри електродвигуна типу 4АК160S6У3

Параметри	Показники
Номінальна потужність P_H , кВт	7,5 кВт
Номінальний ККД, η_H , %	82,5%
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_H$, в.о.	0,77
Номінальний струм ротора I_{2H} , А	18 А
Електрорушійна сила (ЕРС) ротора $E_{2к}$, В	300 В
Синхронна частота обертання n_0 , об/хв.	1000 об/хв.
Кратність критичного моменту μ_K , в.о.	3,5
Номінальне ковзання S_H , %	5,1 %
Критичне ковзання S_K , %	30,1%
Активний опір статора \dot{R}_1 , в.о.	0,054 в.о.
Реактивний опір статора \dot{X}_1 , в.о.	0,079 в.о.
Активний опір ротора, приведений \dot{R}'_2 , в.о.	0,068 в.о.
Реактивний опір ротора, приведений \dot{X}'_2 , в.о.	0,120 в.о.

Оскільки в формулі опори надані в абсолютних одиницях, а в паспортних даних наведені у відносних одиницях, знаходимо їх абсолютні значення.

Номінальний струм статора двигуна розраховується за формулою

$$I_{1H} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H},$$

де $U_{лн}$ – лінійна номінальна напруга, $U_{лн} = 380$ В.

$$I_{1H} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,77 \cdot 0,825} = 17,9 \text{ А.}$$

Повний номінальний опір фази обмотки статора дорівнює

$$Z_{1H} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}},$$

$$Z_{1H} = \frac{220}{17,9} = 12,3 \text{ Ом.}$$

Опори, наведені у відносних одиницях, надані при робочій температурі обмоток двигуна, тому додаткового приведення до робочої температури не потребують. Визначаємо опори обмоток в абсолютних одиницях

$$R_1 = \ddot{R}_1 \cdot Z_{1H};$$

$$R_1 = 0,054 \cdot 12,3 = 0,66 \text{ Ом};$$

$$X_1 = \ddot{X}_1 \cdot Z_{1H};$$

$$X_1 = 0,79 \cdot 12,3 = 0,97 \text{ Ом};$$

$$R'_2 = \ddot{R}'_2 \cdot Z_{1H};$$

$$R'_2 = 0,068 \cdot 12,3 = 0,84 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = \ddot{X}'_2 \cdot Z_{1H};$$

$$X'_2 = 0,120 \cdot 12,3 = 1,48 \text{ Ом.}$$

Виконаємо розрахунок основних точок електромеханічної характеристики:

- точка ідеального холостого ходу (синхронна кутова швидкість)
при цьому ковзання $S = 0$; $I'_2 = 0$;
- точка короткого замикання
при цьому ковзання $S = 1$; $I'_2 = I'_{2п}$ – зведений пусковий струм

$$I'_{2п} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2п} = \frac{220}{\sqrt{(0,66 + 0,84)^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 76,6 \text{ А};$$

- зведене граничне значення струму ротора
при цьому ковзання $S = \infty$; $I'_2 = I'_{2гр}$

$$I'_{2\text{гр}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{гр}} = \frac{220}{\sqrt{0,66^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 86,7 \text{ А};$$

– зведене максимальне значення струму ротора при цьому максимальне ковзання

$$S_{\text{макс}} = -\frac{R'_2}{R_1};$$

$$S_{\text{макс}} = -\frac{0,84}{0,66} = -1,27 \text{ в.о.};$$

$$I'_{2\text{макс}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{(X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{макс}} = \frac{220}{\sqrt{(0,97 + 1,48)^2}} = 89,8 \text{ А};$$

– зведене номінальне значення струму ротора при цьому номінальне ковзання, згідно паспортних даних $S_{\text{н}} = 0,051$

$$I'_{2\text{н}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2\text{н}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,66 + \frac{0,84}{0,051}\right)^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 12,7 \text{ А};$$

– зведене критичне значення струму ротора при цьому критичне ковзання, згідно паспортних даних $S_{\text{к}} = 0,301$

$$I'_{2\text{к}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{к}}}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}};$$

$$I'_{2к} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,66 + \frac{0,84}{0,301}\right)^2 + (0,97 + 1,48)^2}} = 52,0 \text{ А.}$$

За знайденими значеннями зведених струмів і відповідних ним ковзань будемо природну електромеханічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом ротора $\omega = f_1(I'_2)$ (рисунок 4).

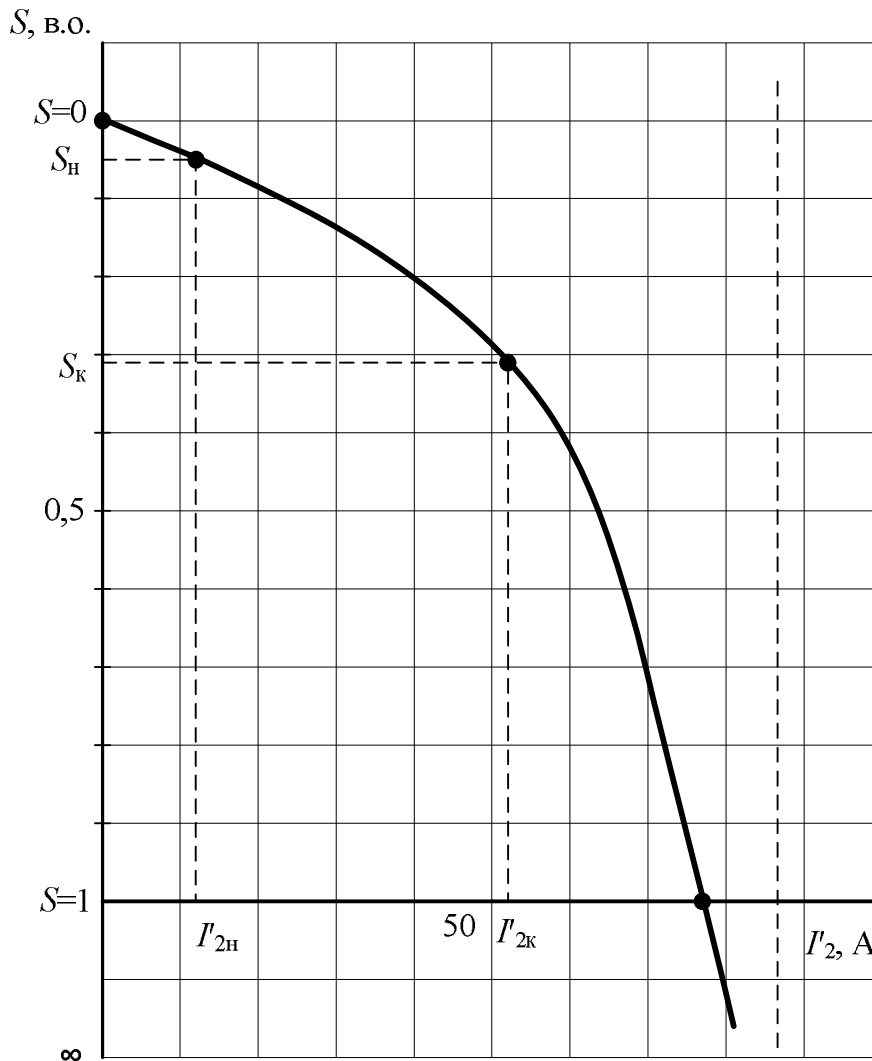


Рисунок 4 – Електромеханічна характеристика $\omega = f_1(I'_2)$ за струмом ротора асинхронного електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3

Електромеханічна характеристика електродвигуна виражена залежністю швидкості (навантаження) від струма статора $\omega = f_2(I_1)$.

Характер зміни струма статора визначається зміною струма ротора у відповідності із рівнянням

$$I_1 = I_0 + I'_{2\text{макс}},$$

де I_0 – струм холостого ходу електродвигуна, А;

$I'_{2\text{макс}}$ – максимальне значення струма ротора, приведене до числа витків статорної обмотки, А.

Кутову швидкість обертання ротора при будь-якому ковзанні визначаємо за рівнянням

$$\omega_i = \omega_0(1 - S_i),$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання електродвигуна, об/хв.

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$$I_0 = 0,3 \cdot 17,9 = 5,37 \text{ А};$$

$$I_{1\text{макс}} = 5,37 + 89,8 = 95,2 \text{ А};$$

$$\omega_{\text{макс}} = 104,7(1 - (-1,27)) = 237,7 \text{ рад/с}.$$

Подальші розрахунки електромеханічної характеристики за струмом статора оформлюємо у вигляді таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку електромеханічної характеристики за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$

S_i , в.о.	$S_{\text{макс}} = -\frac{R'_2}{R_1}$	$S_{\text{х.х.}} = 0$	$S_{\text{н}}$	$S_{\text{к}}$	$S_{\text{п}} = 1$	$S = \pm\infty$
I'_{2i} , А	$I'_{2\text{макс}}$	$I'_2 = 0$	$I'_{2\text{н}}$	$I'_{2\text{к}}$	$I'_{2\text{п}}$	$I'_{2\text{гр}}$
ω_i , рад/с	$\omega_{\text{макс}}$	ω_0	$\omega_{\text{н}}$	$\omega_{\text{к}}$	0	$\omega = \pm\infty$
I_{1i} , А	$I_{1\text{макс}}$	I_0	$I_{1\text{н}}$	$I_{1\text{к}}$	$I_{1\text{п}}$	$I_{1\text{гр}}$

S_i , в.о.	-1,27	0	0,051	0,301	1	$\pm\infty$
I'_{2i} , А	89,8	0	12,7	52	76,6	86,7
ω_i , рад/с	237,7	104,7	99,4	73,2	0	$\mp\infty$
I_{1i} , А	95,2	5,37	18	57,4	82	92,1

За результатами розрахунків (таблиця 3) будемо природну електромеханічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$ (рисунок 5).

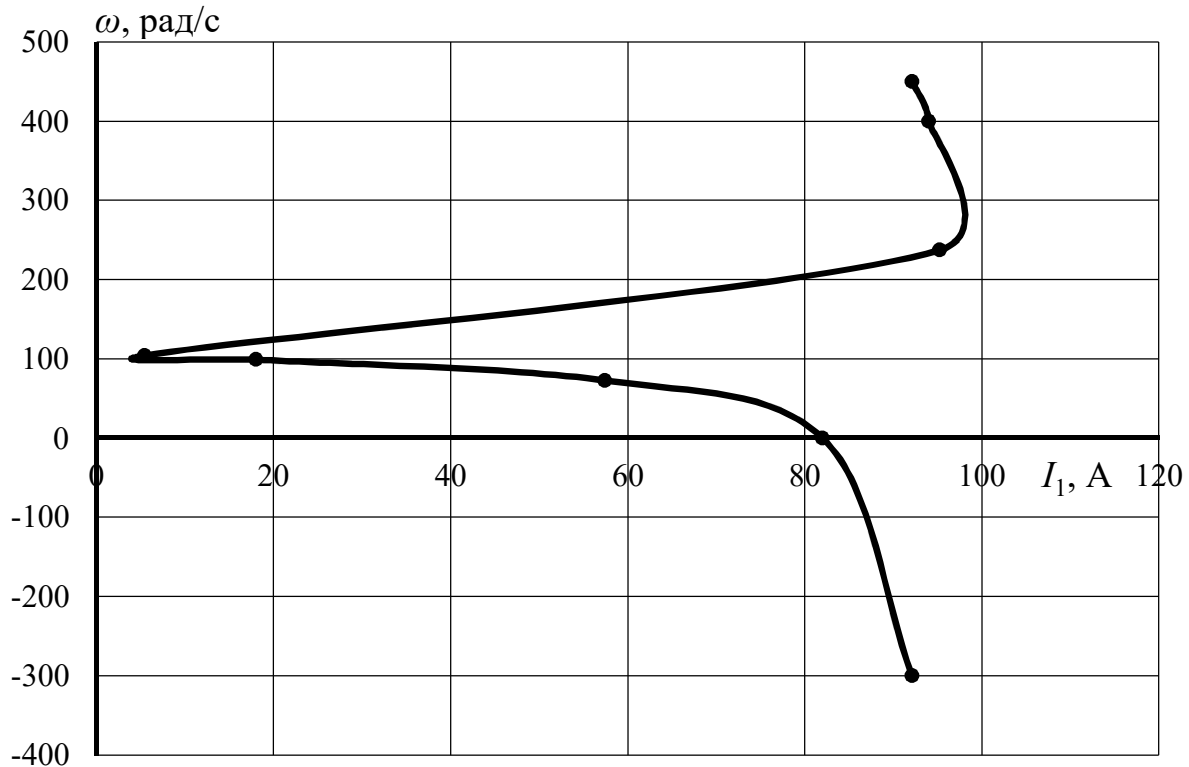


Рисунок 5 – Електромеханічна характеристика $\omega = f_2(I_1)$ за струмом статора асинхронного електродвигуна з фазним ротором типу 4AK160S6Y3

4.2 Для заданого електродвигуна типу 4AK160S6Y3 з фазним ротором розраховуємо природну механічну характеристику.

Розрахуємо характерні точки природної механічної характеристики:

– синхронна кутова швидкість

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Момент двигуна при синхронній кутовій швидкості ω_0 дорівнює $M = 0$;

– номінальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}.$$

Номінальну кутову швидкість, яка відповідає номінальному ковзанню, визначаємо за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{н}});$$

$$\omega_{\text{н}} = 104,7 \cdot (1 - 0,051) = 99,4 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{99,4} = 75,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– критичний (максимальний) момент двигуна

$$M_{\text{к}} = M_{\text{н}} \cdot \mu_{\text{к}},$$

де $\mu_{\text{к}}$ – кратність максимального моменту двигуна, в.о.

За паспортними даними двигуна типу 4АК160S6У3 $\mu_{\text{к}} = 3,5$. Отже

$$M_{\text{к}} = 75,5 \cdot 3,5 = 264,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичну кутову швидкість, яка відповідає критичному ковзанню, визначаємо за формулою

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{к}});$$

$$\omega_{\text{к}} = 104,7 \cdot (1 - 0,301) = 73,2 \text{ рад/с}.$$

За відсутністю в паспортних даних електродвигуна відомостей про кратність пускового моменту пусковий момент двигуна можна визначити за формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + aS_{\text{к}})}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S} + 2aS_{\text{к}}},$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до активного опору фази обмотки ротора, зведеного до обмотки статора, в.о.;

R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R'_2 – приведений активний опір кола ротора, Ом;

S – поточне ковзання, в.о.;

$S_{\text{к}}$ – критичне значення ковзання, в.о.

$$a = \frac{0,66}{0,84} = 0,786.$$

В момент пуску електродвигуна $S = 1$. Отже

$$M_{\text{п}} = \frac{2 \cdot 264,2 \cdot (1 + 0,786 \cdot 0,301)}{\frac{1}{0,301} + \frac{0,301}{1} + 2 \cdot 0,786 \cdot 0,301} = 159,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За розрахованими значеннями моменту і кутової швидкості будемо природну механічну характеристику $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$ (рисунок 6).

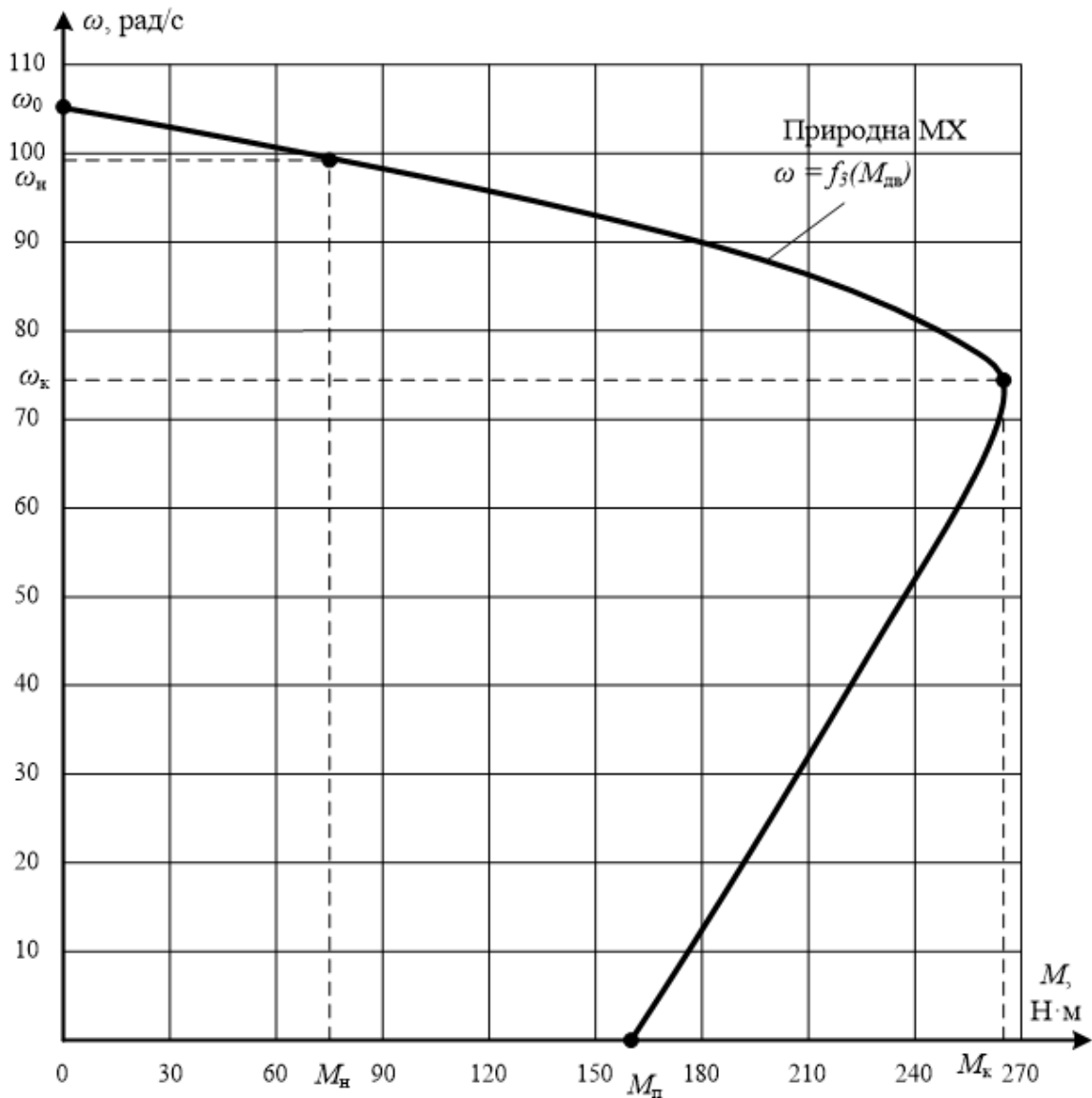


Рисунок 6 – Природна механічна характеристика $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$

АД з фазним ротором типу 4АК160S6У3

4.3 Для заданого електродвигуна типу 4АК160S6У3 з фазним ротором розрахуємо штучну механічну характеристику при введенні в коло ротора додаткового активного опору $\dot{R}_{2\text{д}} = 0,1$ при номінальній напрузі і номінальній частоті мережі.

При введенні в коло ротора активного опору базові величини $U_{1н}$, $f_{1н}$ залишаються незмінними.

Проведемо розрахунок характерних точок штучної механічної характеристики:

– синхронна кутова швидкість

$$\omega_{0шт(R)} = \omega_{0пр} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

– критичне ковзання

$$S_{кшт(R)} = S_{кпр} \cdot \frac{R'_2 + R'_{2д}}{R'_2},$$

де $R'_{2д}$ – приведений опір додаткового опору.

$$R'_{2д} = R_{2д} \cdot K_E^2,$$

де K_E – коефіцієнт трансформації ЕРС.

$$K_E \approx 0,95 \cdot \frac{U_{лн}}{E_{2к}},$$

де 0,95 – коефіцієнт, що враховує 5 % втрату напруги в обмотці статора;

$U_{лн}$ – номінальна лінійна напруга статора, $U_{лн} = 380 \text{ В}$;

$E_{2к}$ – ЕРС між кільцями нерухомого фазного ротора, В. За паспортними даними двигуна $E_{2к} = 300 \text{ В}$.

$$K_E^2 \approx \left(0,95 \cdot \frac{U_{лн}}{E_{2к}} \right)^2;$$

$$K_E^2 \approx \left(0,95 \cdot \frac{380}{300} \right)^2 = 1,45.$$

Додатковий опір визначаємо за формулою

$$R_{2д} = \ddot{R}_{2д} \cdot R_{2н},$$

де $\ddot{R}_{2д}$ – додатковий активний опір роторного кола, в.о. Згідно завдання

$$\ddot{R}_{2д} = 0,1, \text{ в.о.};$$

$R_{2н}$ – номінальний опір роторного кола, Ом.

$$R_{2H} = \frac{E_{2K}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}},$$

де I_{2H} – номінальний струм ротора, А. За паспортними даними $I_{2H} = 18$ А.

$$R_{2H} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 18} = 9,62 \text{ Ом};$$

$$R_{2д} = 0,1 \cdot 9,62 = 0,962 \text{ Ом};$$

$$R'_{2д} = 0,962 \cdot 1,45 = 1,395 \text{ Ом};$$

$$S_{кшт(R)} = 0,301 \cdot \frac{0,84 + 1,395}{0,84} = 0,801;$$

– критична кутова швидкість $\omega_{кшт(R)} = \omega_0 \cdot (1 - S_{кшт(R)})$;

$$\omega_{кшт(R)} = 104,7 \cdot (1 - 0,801) = 20,8 \text{ рад / с};$$

– критичний момент $M_{кшт(R)} = M_{кпр} = 264,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$

– номінальне ковзання

$$S_{Hшт(R)} = S_{Hпр} \cdot \frac{R'_2 + R'_{2д}}{R'_2};$$

$$S_{Hшт(R)} = 0,051 \cdot \frac{0,84 + 1,395}{0,84} = 0,136 \text{ в.о.};$$

– номінальна кутова швидкість

$$\omega_{Hшт(R)} = \omega_0 \cdot (1 - S_{Hшт(R)});$$

$$\omega_{Hшт(R)} = 104,7 \cdot (1 - 0,136) = 90,5 \text{ рад / с};$$

– номінальний момент

$$M_{Hшт(R)} = M_{Hпр} = 75,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– ковзання при пуску дорівнює $S_{п} = 1$;

– пусковий момент знаходимо за формулою

$$M_{\text{пшт}(R)} = \frac{2M_{\text{кшт}(R)} \cdot (1 + a_{\text{шт}(R)} S_{\text{кшт}(R)})}{\frac{S}{S_{\text{кшт}(R)}} + \frac{S_{\text{кшт}(R)}}{S} + 2a_{\text{шт}(R)} S_{\text{кшт}(R)}}$$

де $a_{\text{шт}(R)} = \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2д}} = \frac{0,66}{0,84 + 1,395} = 0,295$.

Ковзання при пуску $S_{\text{п}} = 1$. Отже

$$M_{\text{пшт}(R)} = \frac{2 \cdot 264,2 \cdot (1 + 0,295 \cdot 0,801)}{\frac{1}{0,801} + \frac{0,801}{1} + 2 \cdot 0,295 \cdot 0,801} = 259 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За розрахованими точками:

1 точка $S = 0(\omega_0)$, $M = 0$; 2 точка $S_{\text{ншт}}(\omega_{\text{ншт}})$, $M_{\text{ншт}} = M_{\text{нпр}}$;
 3 точка $S_{\text{кшт}}(\omega_{\text{кшт}})$, $M_{\text{кпр}}$; 4 точка $S_{\text{п}}(\omega = 0)$, $M_{\text{пшт}}$

будуємо штучну механічну характеристику $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ при введенні в коло ротора додаткового активного опору (рисунок 7).

4.4 Розрахуємо та побудуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі на 10 %, коли $\ddot{R}_{2д} = 0$, $f_{1н} = 50$ Гц.

Порядок розрахунку аналогічний п. 4.3:

– синхронна кутова швидкість

$$\omega_{0\text{пр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \omega_{0\text{шт}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

– критичне ковзання не залежить від напруги $S_{\text{кшт}} = S_{\text{кпр}}$;

– критичний момент залежить від напруги і визначається за формулою

$$M_{\text{кшт}(U)} = M_{\text{кпр}} \cdot \left(\frac{U_{1\text{шт}}}{U_{1н}} \right)^2,$$

де $U_{1\text{шт}} = 0,9 \cdot U_{1н}$, оскільки за умовою напругу знижено на 10 %.

$$M_{\text{кшт}(U)} = 264,2 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 220}{220} \right)^2 = 264,2 \cdot 0,81 = 214 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

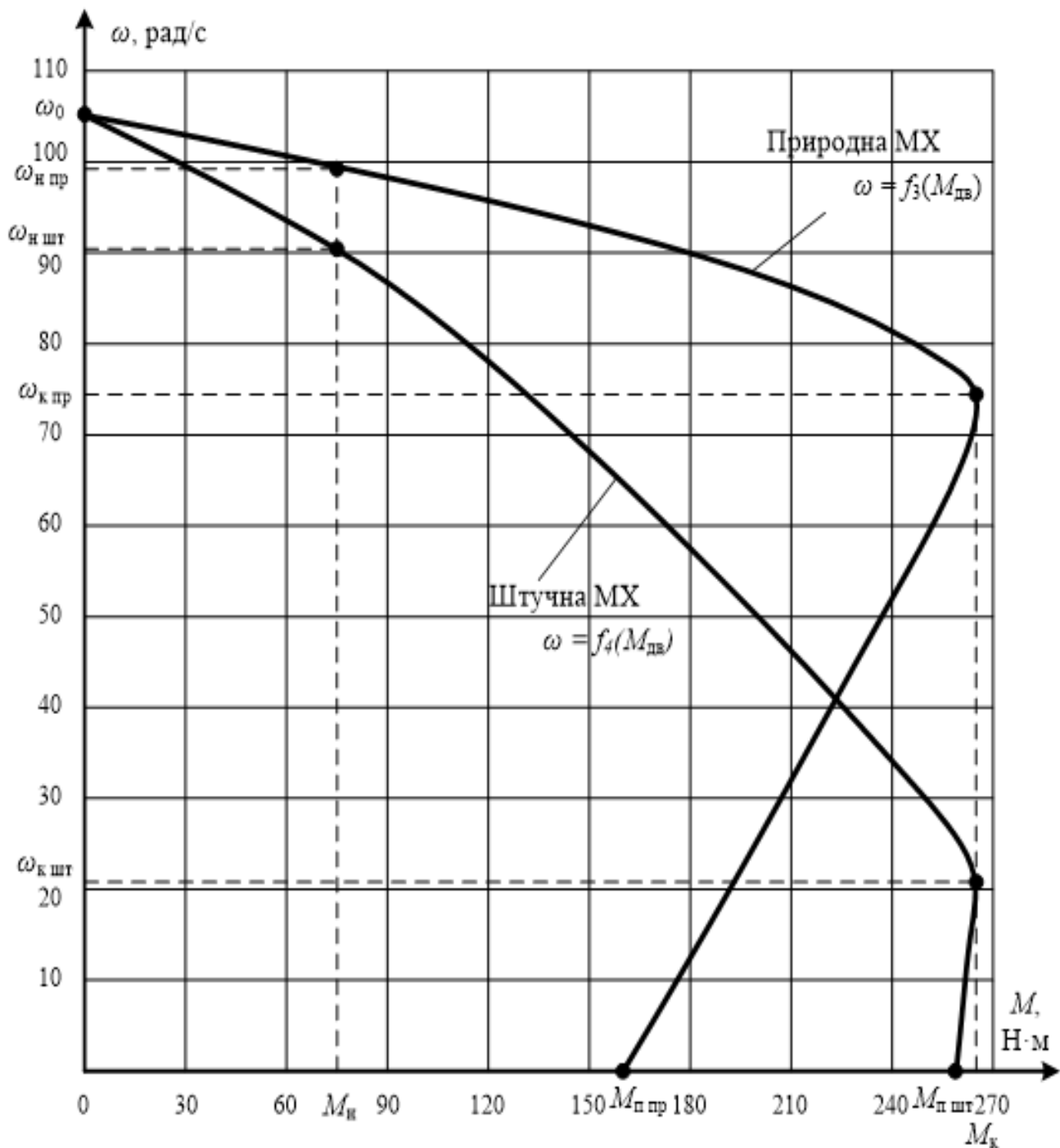


Рисунок 7 – Природна $\omega = f_3(M_{дв})$ та штучна $\omega = f_4(M_{дв})$ механічні характеристики АД з фазним ротором при введенні в коло ротора додаткового активного опору

– номінальний момент при номінальному ковзанні $S_H = 0,051$ дорівнює

$$M_{H_{шт}(U)} = M_{H_{пр}} \cdot \left(\frac{U_{1шт}}{U_{1H}} \right)^2,$$

$$M_{\text{н шт}(U)} = 75,5 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 220}{220} \right)^2 = 75,5 \cdot 0,81 = 61,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– пусковий момент знаходимо за формулою

$$M_{\text{п шт}(U)} = M_{\text{п пр}} \cdot \left(\frac{U_{1\text{шт}}}{U_{1\text{н}}} \right)^2,$$

$$M_{\text{п шт}(U)} = 159,5 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 220}{220} \right)^2 = 159,5 \cdot 0,81 = 129,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За розрахованими точками:

- | | |
|---|---|
| 1 точка $S = 0(\omega_0), M = 0;$ | 2 точка $S_{\text{н пр}}(\omega_{\text{н пр}}), M_{\text{н шт}};$ |
| 3 точка $S_{\text{к пр}}(\omega_{\text{к пр}}), M_{\text{к шт}};$ | 4 точка $S_{\text{п}}(\omega = 0), M_{\text{п шт}}$ |

будуємо штучну механічну характеристику $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ при зниженні напруги на статорі (рисунок 8).

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Таблиці з результатами розрахунків.
- 4 Природну електромеханічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом ротора $\omega = f_1(I_2')$.
- 5 Природну електромеханічну характеристику асинхронного електродвигуна з фазним ротором за струмом статора $\omega = f_2(I_1)$.
- 6 Природну механічну характеристику $\omega = f_3(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
- 7 Штучну механічну характеристику $\omega = f_4(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при введенні в коло ротора активного опору.
- 8 Штучну механічну характеристику $\omega = f_5(M_{\text{дв}})$ асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі.
- 9 Аналіз отриманих результатів.

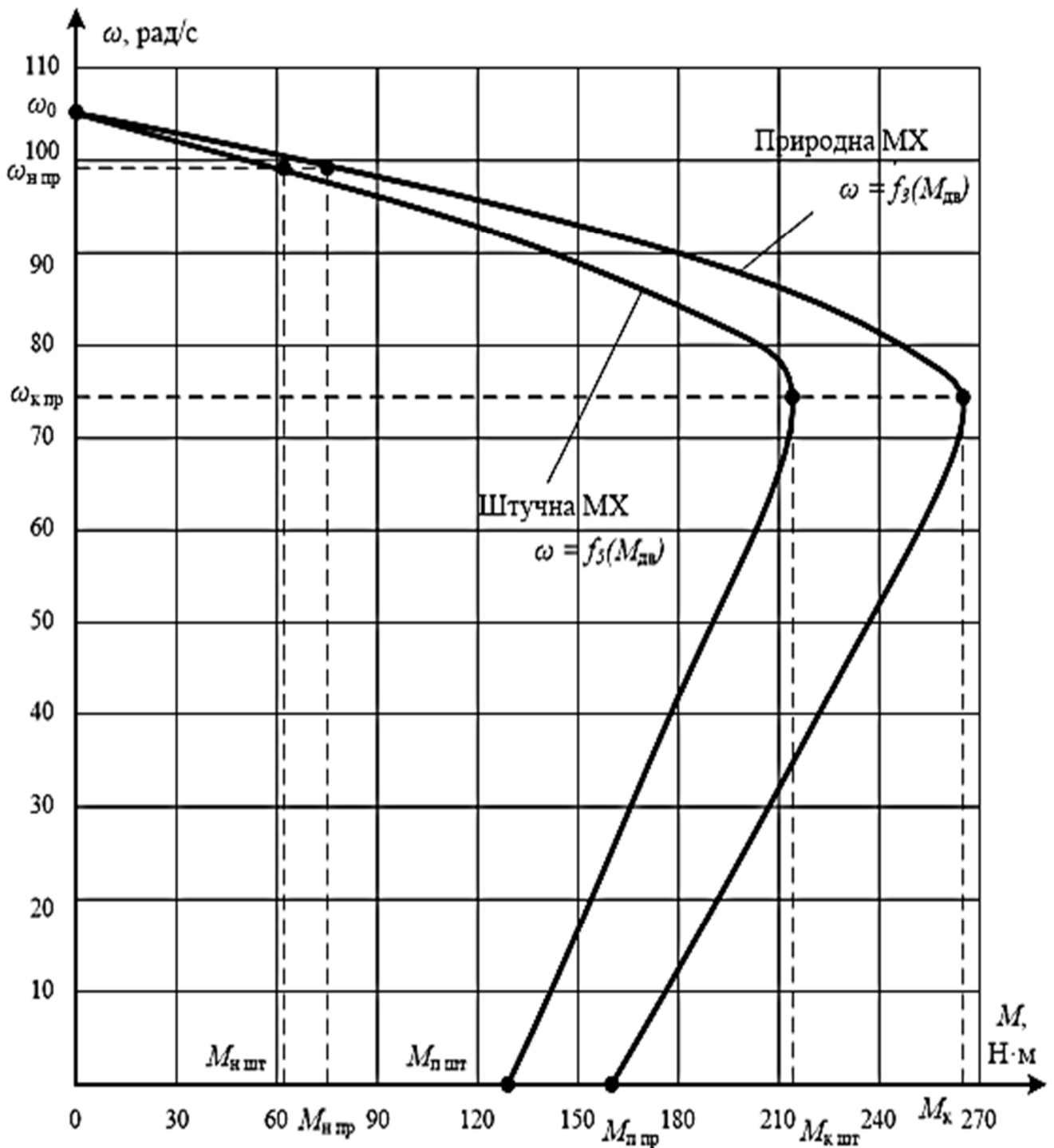


Рисунок 8 – Природна $\omega = f_3(M_{дв})$ та штучна $\omega = f_5(M_{дв})$ механічні характеристики АД з фазним ротором при зниженні напруги на статорі

6 Контрольні питання

- 1 Що називається електромеханічною та механічною характеристиками асинхронного електродвигуна (АД)?
- 2 Що називається природною та штучною характеристиками АД?
- 3 Як визначається синхронна кутова швидкість АД?

- 4 Як за каталожними даними визначити номінальний момент на валу АД?
- 5 Як за каталожними даними визначити номінальну кутову швидкість електродвигуна?
- 6 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна і як його визначити?
- 7 Як розрахувати значення ковзання при максимальному моменті на валу асинхронного електродвигуна?
- 8 Що таке максимальний момент та яким чином його можна розраховувати за каталожними даними електродвигуна?
- 9 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні асинхронного електродвигуна?
- 10 Як залежить момент асинхронного електродвигуна від величини підведеної до нього напруги?
- 11 Які характерні точки можна позначити на природній механічній характеристиці асинхронного електродвигуна?
- 12 Наведіть аналітичну і графічну залежність струму статора від кутової швидкості ротора. Як називається така залежність?
- 13 Яких значень може досягати кратність пускового струму при прямому включенні асинхронного електродвигуна в мережу?
- 14 Вкажіть способи зниження величини струму статора при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.
- 15 Наведіть способи зменшення пускового струму і збільшення пускового моменту при пуску асинхронного електродвигуна з фазним ротором.
- 16 Як залежить максимальний момент від опору кола ротора?
- 17 Як залежать від опору кола ротора асинхронного двигуна пусковий момент і пусковий струм?
- 18 Який вигляд мають штучні механічні характеристики АД з фазним ротором при введенні в коло ротора додаткового активного опору?
- 19 Який вигляд мають штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна з фазним ротором при зниженні напруги на статорі?
- 20 Як можна зменшити пусковий струм і збільшити пусковий момент АД з фазним ротором?

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЧАСТОТОЮ СТРУМУ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в приводі різних виробничих машин при частотному регулюванні кутової швидкості.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів [1, с. 191-200; 4, с. 100-104, 5, с. 61-66; 21].

1.2 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором визначити номінальний момент M_n , критичний момент M_k , номінальну кутову швидкість ω_n , критичне ковзання S_k , критичну кутову швидкість ω_k .

2.2 Розрахувати та побудувати природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

2.3 Розрахувати штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника, генератора постійного струму з незалежним збудженням, насоса та фрезерного верстата при частоті струму $f_{1.1} = 40$ Гц та $f_{1.2} = 60$ Гц.

2.4 Побудувати на одному графіку природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна, що застосовується в приводі підйомника, генератора постійного струму з незалежним збудженням, насоса та фрезерного верстата при регулюванні швидкості обертання електродвигуна частотою струму.

3 Загальні відомості і рекомендації

Найбільш широке розповсюдження одержали наступні способи регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів (АД):

- за допомогою резисторів у колах ротора і статора;
- зміною числа пар полюсів;
- зміною величини напруги живлення статора;
- частотне регулювання.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номінальна потужність, P_H , кВт	Номінальне ковзання, S_H , %	Кратність критичного моменту, μ_K , в.о.
1	АИР132М2	11	3,0	2,2
2	АИР160S2	15	3,0	2,7
3	АИР160М2	18,5	3,0	2,7
4	АИР180S2	22	2,7	2,7
5	АИР180М2	30	2,5	3,0
6	АИР200М2	37	2,0	2,8
7	АИР200S2	45	2,0	2,8
8	АИР225М2	55	2,0	2,6
9	АИР250S2	75	2,0	3,0
10	АИР250М2	90	2,0	3,0
11	АИР132S4	7,5	4,0	2,5
12	АИР132М4	11	3,5	2,7
13	АИР160S4	15	3,0	2,9
14	АИР160М4	18,5	3,0	2,9
15	АИР180S4	22	2,5	2,4
16	АИР180М4	30	2,0	2,7
17	АИР200М4	37	2,0	2,7
18	АИР200L4	45	2,0	2,7
19	АИР225М4	55	2,0	2,6
20	АИР250L4	75	1,5	2,5
21	АИР132S6	5,5	4,0	2,2
22	АИР132М6	7,5	4,0	2,2
23	АИР160S6	11	3,0	2,7
24	АИР160М6	15	3,0	2,7
25	АИР180М6	18,5	2,0	2,4

Суть частотного способу регулювання швидкості АД базується на відомій залежності для синхронної швидкості

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (1)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів електродвигуна.

Для сільськогосподарських машин і агрегатів розроблені частотно-регульовані двигуни з межами регулювання частоти 5 - 60 Гц, а напруги 30 - 380 В.

Зміна частоти струму живлення дає можливість змінювати швидкість обертання двигуна в зоні малих ковзань, а значить і малих втратах енергії в роторному колі. Отже, частотне регулювання швидкості асинхронних двигунів характеризується досить високим коефіцієнтом корисної дії. Система частотного регулювання забезпечує високу плавність в досить широкому діапазоні, а штучні механічні характеристики мають високий коефіцієнт жорсткості.

При регулюванні частоти струму на затискачах двигуна змінюються його параметри. Так, при зниженні частоти і незмінній напрузі збільшується струм намагнічування і, як наслідок, зростає магнітний потік. Збільшення частоти струму призводить до зменшення струму і магнітного потоку двигуна. При незмінному статичному моменті на валу двигуна зростає струм ротора і його температурний режим виходить за межі допустимого. Регулювання частоти струму вимагає одночасного регулювання напруги.

Частотно-регульовані приводи дають можливість регулювати швидкість обертання вверх від номінального значення і вниз. Верхня межа регулювання швидкості обмежується механічною міцністю ротора. Збільшення швидкості обертання відносно номінальної не повинно бути більше ніж у два рази. Мінімальна швидкість обертання обмежується нестабільною роботою перетворювача при низьких частотах.

При регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочої машини напругу на виході перетворювача частоти змінюють виходячи з умови збереження переважувальної здатності двигуна

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = const. \quad (2)$$

Як відомо, максимальний момент двигуна становить

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \right)}. \quad (3)$$

При визначенні закону, за яким необхідно змінювати напругу при зміні частоти струму, вираз (3) записують, зробивши припущення, що $R_1 = 0$

$$M_{\text{к}} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 X_{\text{к}}}. \quad (4)$$

Параметри ω_0 , $X_{\text{к}}$ залежать від частоти струму. Отже, критичний момент виражається залежністю

$$M_{\text{к}} = \frac{AU_{\Phi}^2}{f^2}, \quad (5)$$

де A – коефіцієнт, що включає параметри, незалежні від частоти струму.

Перевантажувальна здатність двигуна при різних частотах струму згідно з формулою (2) має вигляд

$$\frac{U_{\text{фн}}^2}{f_{\text{н}}^2 M_{\text{сн}}} = \frac{U_{\Phi}^2}{f^2 M_{\text{с}}} = \lambda. \quad (6)$$

Вираз (6) у відносних одиницях має вигляд

$$U_* = f_* \sqrt{M_{\text{с}*}}, \quad (7)$$

де U_* , f_* , $M_{\text{с}*}$ – відповідно напруга, частота струму і статичний момент, в.о.

Статичний момент робочої машини у відносних одиницях, якщо зробити припущення, що $M_0 = 0$, записується

$$M_{\text{с}*} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^x = \left(\frac{f}{f_{\text{н}}} \right)^x = f_*^x. \quad (8)$$

З урахуванням (8) вираз (7) матиме вигляд

$$U_* = f_* \sqrt{f_*^x}, \quad (9)$$

де x – показник степеня виду механічної характеристики робочої машини.

При зменшенні частоти $f_1 \ll f_{1\text{нов}}$ збільшується магнітний потік Φ , що призводить до глибокого насичення магнітного кола і збільшенню намагнічувального струму, який знижує енергетичні показники двигуна ($\cos\varphi$, η). Щоб магнітний потік Φ залишався постійним, необхідно при зміні частоти f_1 також змінювати напругу з урахуванням виду механічної характеристики виконавчого органу робочої машини.

Рівняння механічної характеристики робочої машини має вигляд

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_H} \right)^x, \quad (10)$$

де M_c – момент опору при швидкості ω ,

M_0 – момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення), який не залежить від швидкості, Н·м;

$M_{сн}$ – момент опору при номінальній швидкості ω_H , Н·м;

ω_H – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с;

ω_i – поточне значення кутової швидкості, рад/с;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Раціональний закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження M_c . Так при постійному моменті навантаження $M_c = const$ (показник степеня $x = 0$) напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно його частоті

$$\frac{U_1}{f_1} = const. \quad (11)$$

Для механізмів, у яких M_c зменшується нелінійно при збільшенні швидкості (для робочої машини з $x = -1$), відношення (11) має вигляд

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const. \quad (12)$$

Для механізмів з вентиляторним моментом навантаження M_c для робочої машини з $x = 2$ відношення (11) буде мати вигляд

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const. \quad (13)$$

Збільшення частоти джерела живлення вище номінального значення (50 Гц) здійснюється при номінальній напрузі $U_{1н}$, що призводить до зменшення магнітного потоку і електромагнітного моменту, тому в цьому випадку слід знижувати навантаження, щоб уникнути "перекидання" електродвигуна.

Механічні характеристики двигуна при частотному регулюванні швидкості обертання робочих машин з різними механічними характеристиками наведені на рисунку 1 (при $R_1 = 0$).

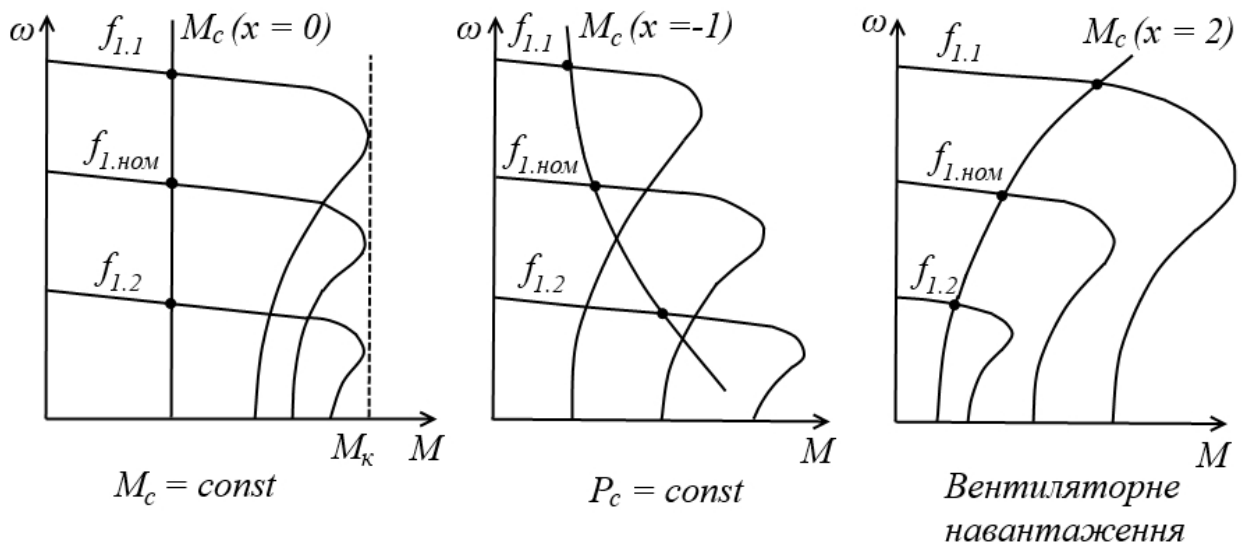


Рисунок 1 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при частотному регулюванні швидкості

Припущення $R_1 = 0$ не вносить помітних похибок в основний закон зміни напруги живлення частотно-регульованих приводів (9), (11), (12), (13) для двигунів великої потужності або при роботі двигунів з незначним зниженням частоти струму. Двигуни великої потужності мають індуктивний опір X_k на порядок більший ніж активний опір R_k . При цьому спад напруги на активному опорі статора незначний і двигун має достатню перевантажувальну здатність.

Для двигунів малої і середньої потужності при номінальній частоті на статорній обмотці активний і індуктивний опори приблизно одного порядку. При зниженні частоти струму індуктивний опір пропорційно знижується, а активний залишиться незмінним. Отже, спад напруги на активному опорі статора R_1 буде збільшуватись і, як наслідок, перевантажувальна здатність двигуна знизиться. При цьому виникає необхідність коригувати основний закон зміни напруги на статорі двигуна.

Даний спосіб широко використовується для якісного регулювання швидкості АД і широко застосовується в теперішній час. Він забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а отримані при цьому характеристики мають високу жорсткість. Частотний спосіб до того ж відрізняється і ще одною важливою властивістю: регулювання швидкості АД в цьому випадку не супроводжується збільшенням його ковзання, тому втрати потужності є невеликими.

Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна при $f_1 = 50$ Гц можна розрахувати за спрощеною формулою Клосса

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S_i}{S_k} + \frac{S_k}{S_i}} \quad (14)$$

Штучна механічна характеристика асинхронного електродвигуна при новій частоті $f_{1.1}$ розраховується за формулою

$$M = \frac{2M_k \cdot \lambda^x}{\frac{\lambda \cdot S_i}{S_k} + \frac{S_k}{\lambda \cdot S_i}}, \quad (15)$$

де λ – коефіцієнт, що показує співвідношення нової частоти струму до частоти струму мережі $f_1 = 50$ Гц;

x – показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання.

$$\lambda = \frac{f_{1.1}}{f_1}, \quad (16)$$

де $f_{1.1}$ – нова частота струму при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна, Гц.

4 Приклад розрахунку

4.1 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна (АД) при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$).

4.1.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна типу АИР250М6 приводу підйомника з технічними даними:

$$P_H = 55 \text{ кВт}; \quad S_H = 2\%; \quad \mu_k = 2,3.$$

Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (1)$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_H – кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

Номінальна кутова швидкість, яка відповідає номінальному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H). \quad (2)$$

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (3)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (4)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Для електродвигуна типу АИР250М6 $p = 3$. Отже

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$\omega_H = 104,67 \cdot (1 - 0,02) = 102,58 \text{ рад/с};$$

$$M_H = \frac{55 \cdot 10^3}{102,58} = 536,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критичний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{\text{кпр}} = M_H \cdot \mu_k, \quad (5)$$

де μ_k – кратність максимального (критичного) моменту електродвигуна, в.о.

За паспортними даними електродвигуна типу АИР250М6 $\mu_k = 2,3$. Отже

$$M_{\text{кпр}} = 536,2 \cdot 2,3 = 1233,26 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню природної механічної характеристики, визначається за формулою

$$\omega_{\text{кпр}} = \omega_0 \cdot (1 - S_k). \quad (6)$$

Критичне ковзання визначаємо за формулою

$$S_{\text{кпр}} = S_H \cdot (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}); \quad (7)$$

$$S_{\text{кпр}} = 0,02 \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}) = 0,09;$$

$$\omega_{\text{кпр}} = 104,67 \cdot (1 - 0,09) = 95,25 \text{ рад/с}.$$

Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна при $f_1 = 50$ Гц розраховуємо за спрощеною формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{кпр}}}{\frac{S_i}{S_{\text{кпр}}} + \frac{S_{\text{кпр}}}{S_i}}. \quad (8)$$

Для зручності розрахунків природної механічної характеристики АД при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц зводимо в таблицю 2.

Таблиця 2 – Розрахункові дані природної механічної характеристики АД при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{к пр}$	$2S_{к пр}$	$3S_{к пр}$	$4S_{к пр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$S_i/S_{к пр}$	0		0,67	1,0	2,0	3,0	4,0	11,11
$S_{к пр}/S_i$	0		1,5	1,0	0,5	0,33	0,25	0,09
$S_i/S_{к пр} + S_{к пр}/S_i$	0		2,17	2,0	2,5	3,33	4,25	11,2
$2M_{к пр}$, Н·м	2466,52							
M , Н·м, за формулою (8)	0	536,2	1136,7	1233,3	986,6	740,7	580,4	2220,2
$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S_i)$, рад/с	104,67	102,58	98,39	95,25	85,83	76,41	66,99	0

За розрахунковими даними таблиці 2 будемо природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц (рисунок 2).

4.1.2 Штучна механічна характеристика асинхронного електродвигуна при новій частоті $f_{1,1}$ розраховується за формулою

$$M_{шт} = \frac{2M_{к пр} \cdot \lambda^x}{\frac{\lambda \cdot S_i}{S_{к пр}} + \frac{S_{к пр}}{\lambda \cdot S_i}},$$

де λ – коефіцієнт, що показує співвідношення нової частоти струму до частоти струму мережі $f_1 = 50$ Гц;

x – показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання.

$$\lambda = \frac{f_{1,1}}{f_1}, \quad (10)$$

де $f_{1,1}$ – нова частота струму при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна, Гц.

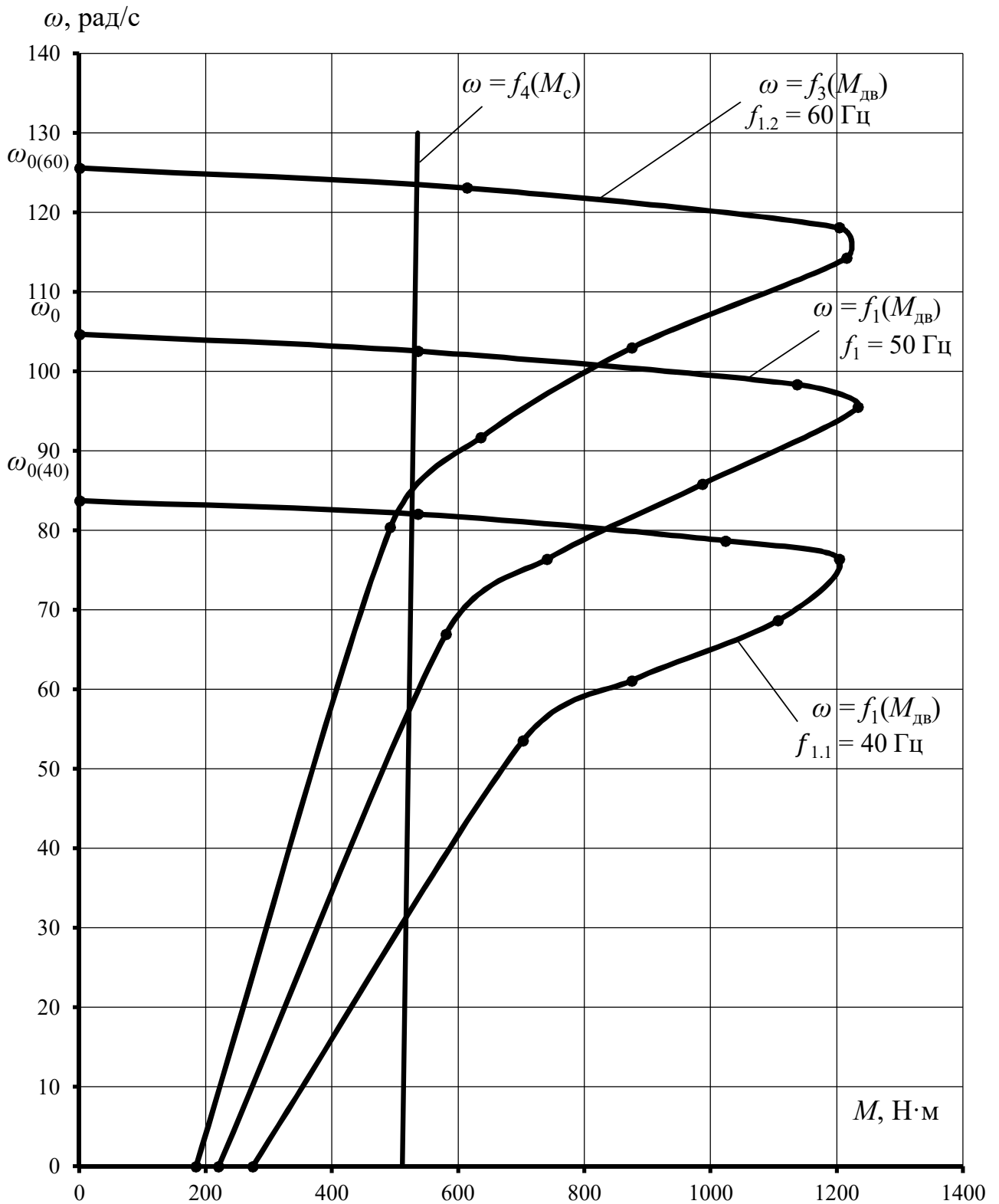


Рисунок 2 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

Для підйомника показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання дорівнює $x = 0$. За умовою нова частота струму $f_{1,1} = 40 \text{ Гц}$. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1.1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^0 = 1.$$

Формула (9) для підйомника з $x = 0$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц буде мати вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр}}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (11)$$

Синхронна кутова швидкість при частоті струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц буде дорівнювати

$$\omega_{0(40)} = \lambda_1 \cdot \omega_{0пр} = 0,8 \cdot \omega_{0пр} = 0,8 \cdot 104,67 = 83,74 \text{ рад/с.}$$

Для зручності розрахунок штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при новій частоті струму $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу підйомника ($x = 0$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							1
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	
$0,8S_i/S_{кпр}$	0	0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	8,89
$S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$2M_{кпр}$, Н·м	2466,52							
M , Н·м, за формулою (11)	0	424,5	1023,5	1203,2	1106,1	874,7	702,7	274,1
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 3 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1.1} = 40$ Гц (рисунок 2).

4.1.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу підйомника при новій частоті струму $f_{1.2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{f_{1,2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^0 = 1.$$

Формула (9) для підйомника з $x = 0$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц буде мати вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр}}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (12)$$

Синхронна кутова швидкість при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц буде дорівнювати

$$\omega_{0(60)} = \lambda_2 \cdot \omega_{0пр} = 1,2 \cdot \omega_{0пр} = 1,2 \cdot 104,67 = 125,6 \text{ рад/с.}$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при новій частоті струму $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 4.

Таблиця 4 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу підйомника ($x = 0$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$2M_{кпр}$, Н·м	2466,52							
M , Н·м, за формулою (12)	0	613,6	1203,2	1215,0	874,7	635,7	492,3	184,3
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 4 будуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1,2} = 60$ Гц (рисунок 2).

4.2 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$).

4.2.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням.

Для приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням використовується той же двигун, що і в пункті 4.1, тому природну механічну характеристику будемо за даними таблиці 2 (рисунок 3).

4.2.2 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 1$ на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1.1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^1 = 0,8.$$

Формула (9) для генератора постійного струму з незалежним збудженням з $x = 1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 0,8}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (13)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 5.

Таблиця 5 – Розрахункові дані штучної МХ АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{кпр}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$0,8 \cdot 2M_{кпр}$, Н·м	1973,22							
M , Н·м, за формулою (13)	0	339,6	818,8	962,5	884,9	699,7	562,2	219,2
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 5 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при $f_{1.1} = 40$ Гц (рисунок 3).

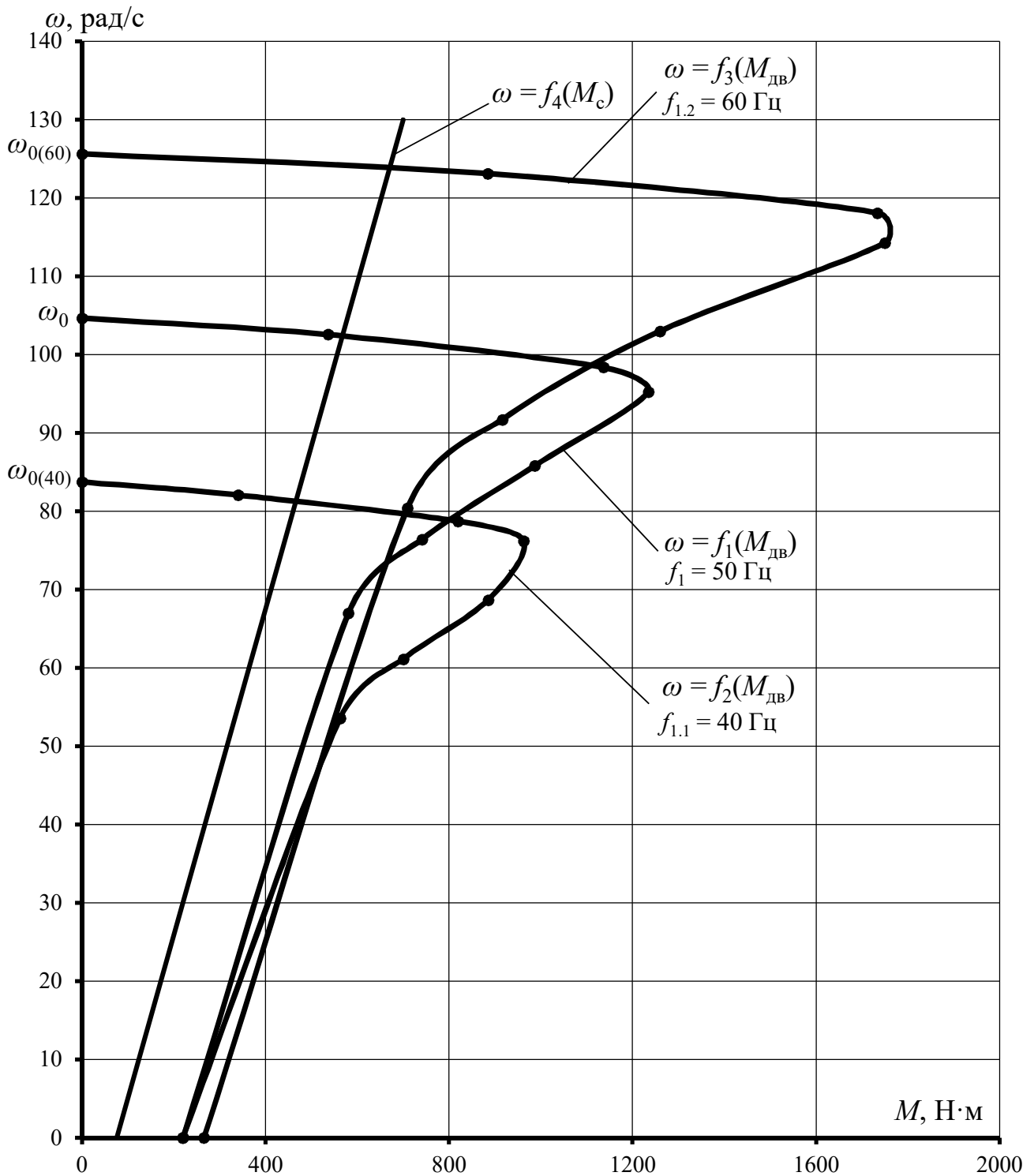


Рисунок 3 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

4.2.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 1$ на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{f_{1,2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^1 = 1,2.$$

Формула (9) для генератора постійного струму з незалежним збудженням з $x=1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 1,2}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (14)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 6.

Таблиця 6 – Розрахункові дані штучної МХ АД приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$1,2 \cdot 2M_{кпр}$, Н·м	2959,82							
M , Н·м, за формулою (14)	0	736,3	1443,8	1458,0	1049,6	762,8	590,8	221,2
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 6 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу генератора постійного струму з незалежним збудженням ($x = 1$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1,2} = 60$ Гц (рисунок 3).

4.3 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу насоса ($x = 2$).

4.3.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу насоса.

Для приводу насоса використовується той же двигун, що і в пункті 4.1, тому природну механічну характеристику будемо за даними таблиці 2 (рисунок 4).

4.3.2 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу насоса з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x=2$ на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1.1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^2 = 0,64.$$

Формула (9) для насоса з $x=2$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{к пр}} \cdot 0,64}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{\text{к пр}}} + \frac{S_{\text{к пр}}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (15)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x=2$) на нову частоту струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 7.

Таблиця 7 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x=2$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							1
	0	S_H	$3S_H$	$S_{\text{к пр}}$	$2S_{\text{к пр}}$	$3S_{\text{к пр}}$	$4S_{\text{к пр}}$	
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{\text{к пр}}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{\text{к пр}}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{\text{к пр}} + S_{\text{к пр}}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$0,64 \cdot 2M_{\text{к пр}}$, Н·м	1578,57							
M , Н·м, за формулою (15)	0	271,7	655,0	770,0	707,9	559,8	449,7	175,4
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 7 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x=2$) при частоті струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц (рисунок 4).

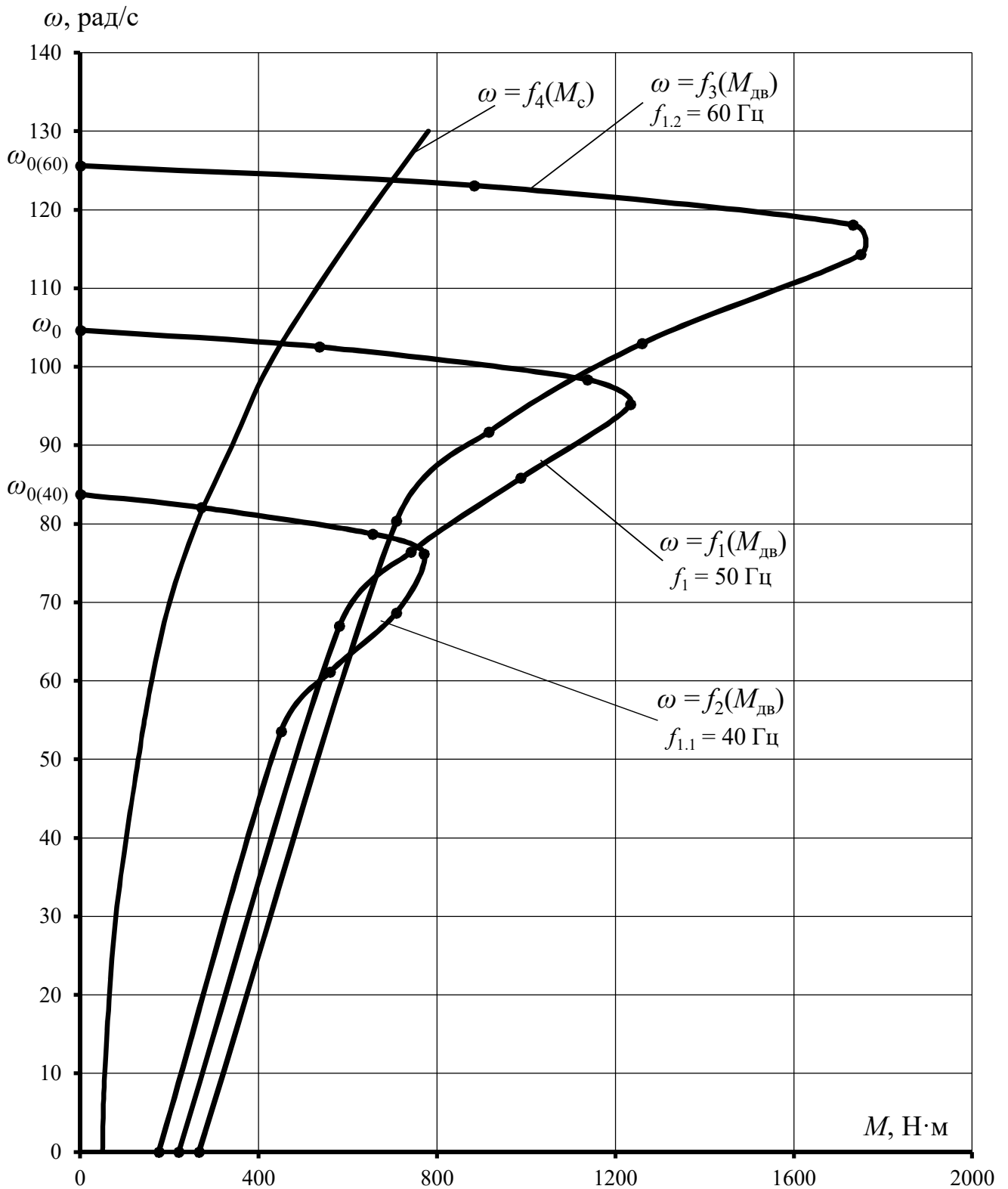


Рисунок 4 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

4.3.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику АД приводу насоса з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 2$ на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{f_{1,2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^2 = 1,44.$$

Формула (9) для насоса з $x = 2$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 1,44}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}}. \quad (16)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 8.

Таблиця 8 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$1,44 \cdot 2M_{кпр}$, Н·м	3551,79							
M , Н·м, за формулою (16)	0	883,5	1732,6	1749,7	1259,5	915,4	708,9	265,5
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 8 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x = 2$) при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц (рисунок 4).

4.4 Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$).

4.4.1 Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу фрезерного верстата.

Для приводу фрезерного верстата використовується той же електродвигун, що і в пункті 4.1, тому природну механічну характеристику будемо за даними таблиці 2 (рисунок 5).

4.4.2 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу фрезерного верстата з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = -1$ на нову частоту струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{f_{1,1}}{f_1} = \frac{40}{50} = 0,8; \quad \lambda_1^x = 0,8^{-1} = 1,25.$$

Формула (9) для фрезерного верстата з $x = -1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 1,25}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{0,8 \cdot S_i}}. \quad (17)$$

Для зручності розрахунок штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) на нову частоту струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 9.

Таблиця 9 – Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при $f_{1,1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{кпр}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$1,25 \cdot 2M_{кпр}$, Н·м	3083,15							
M , Н·м, за формулою (17)	0	530,7	1279,3	1504,0	1382,6	1093,3	878,4	342,6
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 9 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при частоті струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц (рисунок 5).

4.4.3 Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу фрезерного верстата з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = -1$ на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц. Тоді

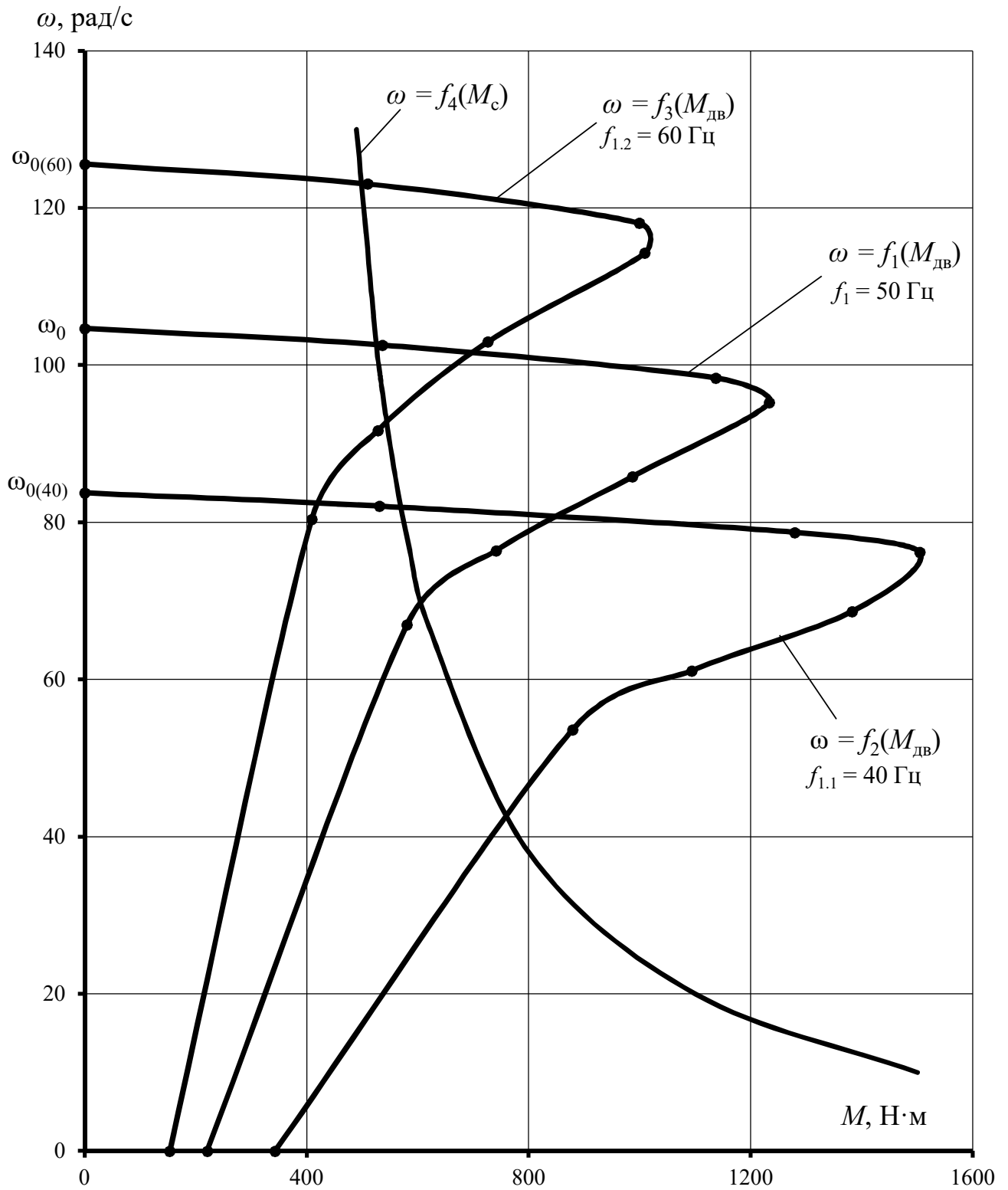


Рисунок 5 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

$$\lambda_2 = \frac{f_{1,2}}{f_1} = \frac{60}{50} = 1,2; \quad \lambda_2^x = 1,2^{-1} = 0,83.$$

Формула (9) для фрезерного верстата з $x = -1$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 0,83}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}} \quad (18)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 10.

Таблиця 10 – Розрахункові дані штучної МХ АД приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_n	$3S_n$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$0,83 \cdot 2M_{кпр}$, Н·м	2047,21							
M , Н·м, за формулою (18)	0	509,3	998,6	1008,5	726,0	527,6	408,7	153,0
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$, рад/с	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 10 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу фрезерного верстата ($x = -1$) при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц (рисунок 5).

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Таблиці з результатами розрахунків.

4 Природні $\omega = f(M_{дв})$ та штучні $\omega = f_{1,1}(M_{дв})$, $\omega = f_{1,2}(M_{дв})$ механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором приводу підйомника, генератора постійного струму з незалежним збудженням, насоса та фрезерного верстата при регулюванні швидкості обертання частотою струму.

- 5 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Яку залежність називають механічною характеристикою асинхронного електродвигуна (АД)?
- 2 Що називається природною та штучною характеристиками АД?
- 3 Що таке максимальний момент та як його можна розрахувати за каталожними даними електродвигуна?
- 4 Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні АД?
- 5 Як розрахувати поточне значення моменту для побудови механічних характеристик АД?
- 6 Як залежить момент асинхронного електродвигуна від величини підведеної до нього напруги?
- 7 Назвіть можливі способи регулювання швидкості АД.
- 8 На чому базується частотний спосіб регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна, які показники регулювання? Які одержують штучні характеристики? Який їх коефіцієнт жорсткості?
- 9 Чи можна використовувати електродвигуни загального призначення в частотно-регульованих приводах? Для яких двигунів ставляться підвищені вимоги до вибору номінального ковзання при їх паралельній роботі?
- 10 З якими межами регулювання частоти і напруги розроблені частотно-регульовані двигуни для сільськогосподарських машин і агрегатів?
- 11 Який напрямок регулювання у частотно-регульованих приводах? Чим обмежується верхня межа регулювання швидкості і мінімальна частота обертання?
- 12 Який параметр двигуна необхідно змінювати для кращого використання АД і одержання високих енергетичних показників його роботи – коефіцієнта потужності, ККД, перевантажувальної здатності – одночасно із зміною частоти напруги живлення? Від чого при цьому залежить закон його зміни?
- 13 Як змінюють напругу на виході перетворювача частоти при регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочих машин?
- 14 Як визначається перевантажувальна здатність двигуна λ ?
- 15 Який вигляд матиме вираз основного закону зміни напруги при частотному способі регулювання швидкості АД?
- 16 Чому при частотному регулюванні разом із зміною частоти необхідно змінювати і напругу?
- 17 За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму?
- 18 Який вигляд мають штучні МХ АД при частотному регулюванні швидкості обертання робочої машини з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x = 0$, $x = 1$, $x = 2$, $x = -1$?

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: засвоїти методику визначення енергетичних показників електропривода (ЕП) постійного струму.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: основні енергетичні показники роботи електропривода, втрати потужності при різних способах регулювання кутової швидкості в електроприводах постійного струму [1, с. 252-263; 4, с. 143-153; 11, с. 303-305; 25].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: втрати енергії в електроприводах постійного струму в гальмівних режимах роботи [1, с. 264-271; 2, с. 154-158; 3, с. 332-348; 4, с. 155-161; 11, с. 305-307; 25].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для двигуна постійного струму розрахувати:

2.1.1 змінні втрати потужності двигуна на природній характеристиці;

2.1.2 змінні втрати потужності при використанні реостатного способу регулювання кутової швидкості двигуна при $n_{\text{розр.}} = 0,5n_{\text{н}}$;

2.1.3 змінні втрати потужності при регулюванні кутової швидкості двигуна напругою при $n_{\text{розр.}} = 0,5n_{\text{н}}$;

2.2 Розрахувати втрати енергії в якірному колі двигуна постійного струму при: пуску вхолосту, динамічному гальмуванні, гальмуванні противмиканням та реверсуванні.

3 Загальні відомості і рекомендації

Енергетичні показники електропривода суттєво залежать від режиму його роботи, характеру зміни моменту навантаження і способів регулювання координат. Звичайно енергетичні показники нерегульованого і регульованого ЕП визначають окремо при їх роботі в усталеному і перехідному режимах.

Потужність P_1 , споживана електроприводом з мережі, витрачається на: реалізацію руху виконавчого органу робочої машини (ВОРМ) $P_{\text{м}} = M_{\text{м}} \cdot \omega_{\text{м}}$; зміну запасу кінетичної і потенціальної енергії в механічній частині ЕП; зміну запасу електричної енергії (ЕЕ) в ємностях та індуктивностях електричної частини; розсіювання у вигляді теплоти.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип двигуна	Потужність, P , кВт	Напруга, U , В	Номинальна частота обертання, n_n , об/хв.	ККД, η_n , %	Опір обмотки якоря при 15 °С, Ом	Момент інерції, J , кг·м ²	Клас нагріво-стійкості ізоляції
1	2ПБ160МУХЛ4	2,1	220	750	76,5	0,99	0,083	F
2	2ПН160МУХЛ4	3	220	750	76,5	0,73	0,083	B
3	2ПФ160МУХЛ4	4,2	220	750	73	0,516	0,083	B
4	2ПН180МУХЛ4	5,6	220	750	79	0,338	0,2	B
5	2ПН180ЛУХЛ4	7,1	220	750	80,5	0,26	0,23	B
6	2ПФ160МУХЛ4	4,2	110	800	74,5	0,11	0,083	B
7	2ПН200МУХЛ4	8,5	220	800	82	0,182	0,25	B
8	2ПБ160МУХЛ4	2,5	220	1000	80	0,59	0,083	F
9	2ПФ160МУХЛ4	6	220	1000	79	0,326	0,083	B
10	2ПН180МУХЛ4	8	110	1000	81,5	0,058	0,2	B
11	2ПН180ЛУХЛ4	10	110	1000	82,5	0,042	0,23	B
12	2ПН180ЛУХЛ4	10	220	1000	82,5	0,168	0,23	B
13	2ПН180МУХЛ4	8	220	1060	83	0,181	0,2	B
14	2ПБ160МУХЛ4	4,2	220	1500	84,5	0,326	0,083	F
15	2ПФ160МУХЛ4	7,5	220	1500	83	0,145	0,083	B
16	2ПН180МУХЛ4	15	220	1500	86	0,338	0,2	B
17	2ПН180ЛУХЛ4	18,5	220	1500	87	0,065	0,23	B
18	2ПН200МУХЛ4	22	220	1500	87,5	0,046	0,25	B
19	2ПН160МУХЛ4	7,5	110	1600	83	0,037	0,083	B
20	2ПБ160МУХЛ4	6	220	2120	86,5	0,145	0,083	F
21	2ПН200МУХЛ4	36	220	2200	88,5	0,025	0,25	B
22	2ПФ160МУХЛ4	13	220	2240	87	0,081	0,083	B
23	2ПН180МУХЛ4	26	220	2450	88	0,038	0,2	B
24	2ПБ160МУХЛ4	7,1	220	3000	85,5	0,081	0,083	F
25	2ПФ160МУХЛ4	16	220	3150	87	0,037	0,083	B

В теплоту перетворюються втрати: в обмотках електричного та електро-механічного перетворювачів і керуючих пристроїв; пов'язані з перемагнічуванням сталі; в ємностях; на тертя у механічній частині. Економічність роботи ЕП в будь-якому режимі характеризується відношенням виконаної механічної роботи до кількості електроенергії, спожитої з мережі

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ел}}} = \frac{\int_0^{T_{\text{ц}}} M_{\text{м}}(t) \omega_{\text{м}}(t) dt}{\int_0^{T_{\text{ц}}} P_1 dt}, \quad (1)$$

де $\eta_{\text{ц}}$ – цикловий ККД ЕП;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість робочого циклу;

$A_{\text{мех}}, A_{\text{ел}}$ – корисна механічна робота і споживана з мережі електрична енергія;

P_1 – потужність, споживана електроприводом з мережі.

Приймаючи для окремих відрізків часу потужність сталою, замість формули (1) одержимо

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2)$$

де P_2 – потужність на валу електродвигуна.

При відомих значеннях ККД перетворювача електроенергії $\eta_{\text{п.ел}}$, двигуна $\eta_{\text{дв}}$ і механічних передач $\eta_{\text{мех}}$ вираз (2) буде мати такий вигляд

$$\eta = \eta_{\text{п.ел}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (3)$$

Потужність втрат в нерегульованому ЕП складається з потужності втрат у двигуні і механічній частині. Втрати потужності в механічній передачі $\Delta P_{\text{мех}}$ зумовлені в основному тертям у рухомих частинах. Ці втрати оцінюються величиною ККД, значення якого для різних видів передач і при різних навантаженнях є в довідковій літературі.

Втрати потужності у двигуні є сумою постійних $\Delta P_{\text{с}}$ і змінних $\Delta P_{\text{в}}$ втрат

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{в}}. \quad (4)$$

Під постійними втратами потужності розуміють втрати потужності, що не

залежать від струму двигуна. До них належать: втрати в сталі магнітопровода, на тертя в підшипниках, вентиляційні, в провідниках обмоток збудження ДПС та синхронних двигунів.

Під змінними втратами розуміють такі, які виникають у провідниках обмоток двигуна під час протікання по них струму навантаження.

Змінні втрати потужності у двигунах постійного струму визначаються

$$\Delta P_v = I^2 R_{\text{дв}} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{дв}} \left(\frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{вн}} \left(\frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{вн}} K_3^2, \quad (5)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна, в.о.;

$\Delta P_{\text{вн}} = I_{\text{н}}^2 \cdot R_{\text{дв}}$ – втрати потужності в колі якоря при номінальному навантаженні, Вт;

$I_{\text{н}}$ – номінальний струм двигуна, А;

$R_{\text{дв}}$ – внутрішній опір кола якоря, Ом.

Змінні втрати потужності у двигунах різних типів визначають за однако-вим виразом

$$\Delta P_v = \Delta P_{\text{вн}} K_3^2. \quad (6)$$

Повні втрати потужності в двигуні

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{\text{вн}} K_3^2 = \Delta P_{\text{вн}} \left(\frac{\Delta P_c}{\Delta P_{\text{вн}}} + K_3^2 \right) = \Delta P_{\text{вн}} (\alpha + K_3^2), \quad (7)$$

де $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{\text{вн}}}$ – коефіцієнт втрат.

Величина α залежить від номінальної потужності та кутової швидкості і для ДПС НЗ знаходиться в межах 1...1,5.

Втрати потужності під час роботи двигуна в номінальному режимі, коли $K_3 = 1$, знаходять за паспортними даними двигуна

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}. \quad (8)$$

Втрати потужності при холостому ході

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{н}} \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha + 1} \right) = \frac{P_{\text{н}} \cdot \alpha \cdot (1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}} \cdot (\alpha + 1)}. \quad (9)$$

Постійні втрати потужності

$$\Delta P_c = \Delta P_{\text{вн}}. \quad (10)$$

Повні втрати потужності при i -му навантаженні двигуна

$$\Delta P_i = P_i \cdot \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (11)$$

де η_i – ККД електродвигуна при навантаженні P_i .

Постійні втрати потужності в двигуні постійного струму складаються із втрат в колі збудження ΔP_3 , механічних ΔP_M і втрат у сталі $\Delta P_{\text{ст}}$. Механічні втрати і втрати в сталі можуть бути визначені за наближеною формулою

$$\Delta P_M + \Delta P_{\text{ст}} \approx (\Delta P_M + \Delta P_{\text{ст}})_H \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2, \quad (12)$$

де $(\Delta P_M + \Delta P_{\text{ст}})_H$ – втрати механічні і в сталі при номінальній кутовій швидкості.

Змінні втрати в якірному колі двигуна постійного струму

$$\Delta P_v = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{дв}} = M \cdot (\omega_{0p} - \omega), \quad (13)$$

де ω_{0p} – швидкість ідеального холостого ходу двигуна при його роботі на штучній (регульовальній характеристиці);

$I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{дв}}$ – відповідно струм та опір якірного кола;

M – електромагнітний момент двигуна при кутовій швидкості ω .

При регулюванні швидкості ДПС НЗ реостатним способом кутова швидкість $\omega_{0p} = \omega_{0H}$, тому змінні втрати потужності зростають пропорційно відносно

ному перепаду швидкості $\delta = \frac{\omega_{0H} - \omega}{\omega_{0H}}$

$$\Delta P_v = M \cdot \omega_{0H} \cdot \delta, \quad (14)$$

а повні втрати в якірному колі двигуна визначаються за формулою

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_3 + (\Delta P_M + \Delta P_{\text{ст}})_H \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 + M \cdot (\omega_{0p} - \omega), \quad (15)$$

де ΔP_3 - втрати потужності в колі збудження.

Постійні втрати при зниженні швидкості зменшуються. Зміна сумарних втрат при цьому визначається співвідношенням постійних і змінних втрат для реального навантаження і конкретного двигуна.

При регулюванні швидкості ослабленням поля збудження двигуна при $P_M = const$ втрати в колі збудження ΔP_3 зменшуються внаслідок зменшення струму збудження. Разом з тим, в результаті збільшення швидкості зростають механічні втрати ΔP_M . Тому постійні втрати можна вважати незмінними, якщо $\Delta P_3 \approx \Delta P_M$. Крім того, коли $P_M = const$, $I_\alpha = I_{\alpha H} = const$, то й змінні втрати залишаються незмінними при різних швидкостях. Отже,

$$\Delta P = \Delta P_{cH} + \Delta P_{vH} \approx const,$$

тобто при регулюванні з постійною потужністю втрати в двигуні незмінні.

При регулюванні кутової швидкості ДПС зміною напруги при сталому моменті навантаження $M_c = M_H$ струм якоря залишається незмінним і дорівнює номінальному, разом з цим є незмінними та дорівнюють номінальним і змінні втрати, тобто $\Delta P_v = \Delta P_{vH}$.

Для визначення втрат енергії в перехідних процесах необхідно знати початкові та кінцеві умови динамічного режиму, які можна визначити із статичних механічних (електромеханічних) характеристик.

Втрати енергії *при пуску вхолосту* ($\omega_{\text{поч}} = 0$, $\omega_{\text{кін}} \approx \omega_0$) розраховуються за формулою

$$\Delta A_{20\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (16)$$

Отже, чисельно, втрати енергії дорівнюють запасу кінетичної енергії у механічній частині ЕП в кінці пуску.

Втрати енергії в якірному колі *при динамічному гальмуванні* і $M_c = 0$ ($\omega_{\text{поч}} = \omega_0$, $\omega_{\text{кін}} = 0$) розраховуються за формулою

$$\Delta A_{20\text{д.г.}} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (17)$$

Втрати енергії *при гальмуванні противмиканням* при $M_c = 0$ ($\omega_{\text{поч}} = -\omega_0$, $\omega_{\text{кін}} = 0$) розраховуються за формулою

$$\Delta A_{20\text{г.п.в.}} = 3J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (18)$$

Таким чином, втрати енергії під час гальмування противмиканням втричі більші, ніж втрати під час розгону або динамічному гальмуванні.

Втрати енергії *при реверсуванні* становлять

$$\Delta A_{20p} = 4J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (19)$$

У цьому випадку втрати дорівнюють сумі втрат при гальмуванні противмиканням і при розгоні.

4 Приклад розрахунку

Для двигуна постійного струму з незалежним збудженням з технічними даними: номінальна потужність $P_H = 5,5$ кВт; номінальна напруга $U_H = 220$ В; номінальна частота обертання двигуна $n_H = 1000$ об/хв; опір якірної обмотки при температурі 15 °С $R_{я(15)} = 0,15$ Ом; клас нагрівостійкості ізоляції А; номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta_H = 83,3\%$; сумарний приведений момент інерції двигуна $J_{дв} = 0,2$ кг·м², розрахувати: змінні втрати потужності в двигуні на природній характеристиці; змінні втрати потужності при використанні реостатного способу регулювання кутової швидкості двигуна при $n_{розр.} = 0,5n_H$; змінні втрати потужності при регулюванні кутової швидкості двигуна напругою на якорі двигуна при $n_{розр.} = 0,5n_H$ та величину напруги при регулюванні; втрати енергії в якірному колі двигуна постійного струму при пуску вхолосту, при динамічному гальмуванні, гальмуванні противмиканням та реверсуванні.

4.1 Розрахуємо змінні втрати потужності в електродвигуні на природній характеристиці за формулою

$$\Delta P_H = I_{яH}^2 \cdot R_{я},$$

де $I_{яH}$ – номінальний струм якоря, А;

$R_{я}$ – опір обмотки якоря, Ом.

Номінальний струм якоря розраховуємо за формулою

$$I_{яH} = \frac{P_H}{U_H \cdot \eta_H},$$

де P_H – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

U_H – номінальна напруга, В;

η_H – номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна, в.о.

$$I_{яH} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,833} = 30 \text{ А.}$$

Приведемо опір якоря до робочої температури обмотки двигуна. Для класу нагрівостійкості А допустима гранична температура 105 °С (таблиця 2).

Таблиця 2 – Допустимі граничні температури нагрівання для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості

Клас нагрівостійкості ізоляції	Допустима гранична температура, °С	Короткий перелік основних груп ізоляційних матеріалів
У	90	Непросочені і не занурювані в рідкий електроізоляційний матеріал. Волоконні матеріали з целюлози, бавовни або натурального, штучного і синтетичного шовку, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші сполучення матеріалів
А	105	Волоконні матеріали з целюлози, бавовни або натурального, штучного і синтетичного шовку, просочені рідким електроізоляційним матеріалом
Е	120	Синтетичні органічні матеріали (плівки, волокна, смоли, компаунди та ін.)
В	130	Матеріали на основі слюди (у тому числі на органічних підкладках), азбесту і скловолкна, що застосовуються з органічними зв'язуючими і просочуючими сполуками
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолкна, що застосовуються із синтетичними зв'язуючими і просочуючими сполуками, які відповідають даному класу нагрівостійкості
Н	180	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолкна у сполученні з кремнійорганічними зв'язуючими і просочуючими сполуками, кремнійорганічні еластomers
С	200	Слюда, керамічні матеріали, скло, кварц або їх комбінації без зв'язуючих або з неорганічними і елементоорганічними сполуками
	220	
	250	

Отже

$$R_{я(105)} = R_{я(15)} \cdot (1 + \gamma_{\text{міді}} \cdot \Theta),$$

де $R_{я(15)}$ – опір якірної обмотки при температурі 15 °С, Ом;

$\gamma_{\text{міді}}$ – температурний коефіцієнт міді, Ом/°С, $\gamma_{\text{міді}} = 0,004$ Ом/°С;

Θ – різниця температур обмотки двигуна і повітря, °С.

$$\Theta = 105 - 15 = 90 \text{ °С};$$

$$R_{я(105)} = 0,15 \cdot (1 + 0,004 \cdot 90) = 0,2 \text{ Ом};$$

$$\Delta P_{\text{H}} = 30^2 \cdot 0,2 = 180 \text{ Вт}.$$

4.2 Розрахуємо змінні втрати потужності при використанні реостатного способу регулювання кутової швидкості двигуна при $n_{\text{розр.}} = 0,5n_{\text{H}}$.

Змінні втрати потужності при використанні реостатного способу регулювання кутової швидкості (при введенні додаткового опору у коло обмотки якоря) визначаємо за формулою

$$\Delta P_{\text{H}(R)} = I_{\text{ян}}^2 \cdot (R_{я(105)} + R_{\text{д}}),$$

де $R_{\text{д}}$ – активний опір додаткового резистора, Ом.

Визначимо величину активного опору додаткового резистора, при введенні якого $n_{\text{розр.}} = 0,5n_{\text{H}}$, з формули для штучної електромеханічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

$$\omega = \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_{\text{H}}},$$

де $\omega = \omega_{\text{розр.}}$ – розрахункова кутова швидкість штучної механічної характеристики, рад/с;

k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей двигуна, 1/рад;

Φ_{H} – номінальний магнітний потік, Вб.

Значення коефіцієнта магнітного потоку визначаємо за формулою

$$k\Phi_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{я(105)}}{\omega_{\text{H}}},$$

де ω_H – номінальна кутова швидкість, рад/с;

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30};$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$k\Phi_H = \frac{220 - 30 \cdot 0,2}{104,67} = 2,04 \text{ Вб/рад};$$

$$\omega_{\text{розр.}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{розр.}}}{30} = \frac{\pi \cdot 0,5n_H}{30};$$

$$\omega_{\text{розр.}} = \frac{3,14 \cdot 0,5 \cdot 1000}{30} = 51,67 \text{ рад/с.}$$

Отже, з формули

$$\omega = \frac{U_H - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi_H}$$

визначаємо активний опір додаткового резистора

$$\omega_{\text{розр.}} = \frac{U_H - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}(105)} + R_{\text{д}})}{k\Phi_H} = \frac{U_H - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}(105)} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{д}}}{k\Phi_H};$$

$$R_{\text{д}} = \frac{U_H - k\Phi_H \cdot \omega_{\text{розр.}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}(105)}}{I_{\text{я}}};$$

$$R_{\text{д}} = \frac{220 - 2,04 \cdot 51,67 - 30 \cdot 0,2}{30} = 3,62 \text{ Ом.}$$

Визначаємо змінні втрати потужності при використанні реостатного способу регулювання кутової швидкості

$$\Delta P_{\text{н}(R)} = 30^2 \cdot (0,2 + 3,62) = 3438 \text{ Вт.}$$

4.3 Розрахуємо змінні втрати потужності при регулюванні кутової швидкості двигуна напругою на якорі двигуна та величину напруги при регулюванні при $n_{\text{розр.}} = 0,5n_{\text{н}}$.

З рівняння електромеханічної характеристики

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{k\Phi_{\text{н}}},$$

де $\omega = \omega_{\text{розр.}}$ – розрахункова кутова швидкість штучної механічної характеристики, рад/с;

$U = U_{\text{розр.}}$ – напруга штучної електромеханічної характеристики, В,

знайдемо величину напруги при регулюванні.

Отже,

$$\omega_{\text{розр.}} = \frac{U_{\text{розр.}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}(105)}}{k\Phi_{\text{н}}};$$

$$U_{\text{розр.}} = \omega_{\text{розр.}} \cdot k\Phi_{\text{н}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}(105)};$$

$$U_{\text{розр.}} = 51,67 \cdot 2,04 + 30 \cdot 0,2 = 111,4 \text{ В.}$$

Розрахуємо змінні втрати потужності в електродвигуні при регулюванні напругою на якорі двигуна з кутовою швидкістю $\omega_{\text{розр.}} = 51,67$ рад/с.

$$\Delta P_{\text{н}(U)} = I_{\text{ян}}^2 \cdot R_{\text{я}},$$

$$\Delta P_{\text{н}(U)} = 30^2 \cdot 0,2 = 180 \text{ Вт.}$$

4.4 Розрахуємо втрати енергії в якірному колі двигуна постійного струму при пуску вхолосту, динамічному гальмуванні, гальмуванні противмиканням та реверсуванні.

Втрати енергії в якірному колі при пуску вхолосту визначаємо за виразом

$$\Delta A_{\text{п}} = J \cdot \frac{\omega_0^2}{2},$$

де J – сумарний приведений момент інерції, кг·м²;

ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с.

Синхронну кутову швидкість знаходимо за формулою

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H};$$

$$\omega_0 = \frac{220}{2,04} = 107,84 \text{ рад/с};$$

$$\Delta A_{\text{п}} = 0,2 \cdot \frac{107,84^2}{2} = 1163 \text{ Дж} = 1,163 \text{ кДж}.$$

Втрати енергії при динамічному гальмуванні дорівнюють

$$\Delta A_{\text{д.г.}} = J \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta A_{\text{д.г.}} = 0,2 \cdot \frac{107,84^2}{2} = 1163 \text{ Дж} = 1,163 \text{ кДж}$$

Втрати енергії при гальмуванні противмиканням визначаємо за формулою

$$\Delta A_{\text{г.п.в.}} = 3J \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta A_{\text{г.п.в.}} = 3 \cdot 0,2 \cdot \frac{107,84^2}{2} = 3488,54 \text{ Дж} = 3,49 \text{ кДж}.$$

Втрати енергії при реверсуванні становлять

$$\Delta A_{20p} = 4J \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta A_p = 4 \cdot 0,2 \cdot \frac{107,84^2}{2} = 4651,8 \text{ Дж} = 4,652 \text{ кДж}.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Назвіть основні енергетичні показники електропривода.
- 2 Чим характеризується економічність роботи електропривода?
- 3 Що таке постійні і змінні втрати потужності в електроприводі?
- 4 Як знайти втрати потужності при номінальному режимі двигуна і при холостому ході?
- 5 З чого складаються постійні втрати потужності в двигуні постійного струму з незалежним збудженням в регульованому електроприводі?
- 6 Як визначаються повні втрати потужності при регулюванні швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням?
- 7 Вкажіть шляхи зменшення втрат енергії в електроприводах.

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку енергетичних показників асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при різних навантаженнях на валу.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: основні енергетичні показники асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [1, с. 252-258; 4, с. 143-149; 26].

1.2 Відповісти на контрольні питання.

2 Програма роботи

2.1 Для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором визначити і побудувати залежності: $\eta = f_1(P_2)$, $\Delta P = f_2(P_2)$, $P_1 = f_3(P_2)$, де η – коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна, в.о., P_2 – потужність на валу електродвигуна, кВт; ΔP – втрати потужності в електродвигуні, кВт; P_1 – спожита з мережі потужність, кВт.

2.2 Побудувати залежність $\cos \varphi = f_4(P_2)$.

2.3 Визначити і побудувати залежність $Q = f_5(P_2)$, де Q – спожита з мережі реактивна потужність, кВар.

2.4 Зробити висновки, що свідчать про зміну параметрів електродвигуна від зміни навантаження на валу: $\eta = f_1(P_2)$, $\Delta P = f_2(P_2)$, $P_1 = f_3(P_2)$, $\cos \varphi = f_4(P_2)$, $Q = f_5(P_2)$.

3 Загальні відомості і рекомендації

До основних енергетичних показників роботи електропривода (ЕП) належать втрати потужності ΔP та енергії ΔA , коефіцієнт корисної дії (ККД) η і коефіцієнт потужності $\cos \varphi$.

Коефіцієнт корисної дії визначається відношенням потужності на валу двигуна до спожитої з мережі активної потужності. Величина його свідчить про те, наскільки раціонально відбувається електромеханічне перетворення електричної енергії в електродвигуні, яку долю при цьому мають втрати електричної енергії.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Типорозмір двигуна	Номінальна потужність, Р _н , кВт	КПД η , %, при коефіцієнті навантаження					Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, в.о. при коефіцієнті навантаження					Синхронна швидкість, рад/с
			0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	
1	4A132M2Y3	11,0	80,0	87,0	88,0	87,0	65,0	0,82	0,87	0,90	0,90	0,90	314
2	4A160S2Y3	15,0	80,0	86,5	88,0	88,0	87,0	0,65	0,82	0,87	0,90	0,90	314
3	4A160M2Y3	18,5	82,0	87,5	88,5	88,5	87,0	0,72	0,86	0,90	0,92	0,92	314
4	4A180S2Y3	22,0	79,0	86,0	88,5	88,5	88,0	0,65	0,82	0,86	0,91	0,92	314
5	4A180M2Y3	30,0	82,0	88,5	90,5	90,5	89,0	0,66	0,82	0,88	0,90	0,90	314
6	4A200M2Y3	37,0	81,0	87,5	90,0	90,0	89,5	0,67	0,82	0,87	0,89	0,89	314
7	4A200L2Y3	45,0	83,0	89,0	91,0	91,0	90,5	0,71	0,85	0,89	0,90	0,90	314
8	4A225M2Y3	55,0	82,5	89,5	91,0	91,0	90,5	0,78	0,89	0,91	0,92	0,92	314
9	4A250S2Y3	75,0	75,0	88,0	91,0	91,0	91,0	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	314
10	4A250M2Y3	90,0	90,0	90,0	92,0	92,0	91,5	0,71	0,84	0,89	0,90	0,90	314
11	4A132M4Y3	11,0	80,0	86,0	88,0	87,5	87,0	0,55	0,75	0,84	0,87	0,88	157
12	4A160S4Y3	15,0	86,0	89,5	89,5	88,5	86,5	0,63	0,81	0,87	0,88	0,88	157
13	4A160M4Y3	18,5	87,5	90,5	90,5	89,5	87,5	0,66	0,82	0,86	0,88	0,88	157
14	4A180S4Y3	22,0	85,5	89,5	90,0	90,0	87,0	0,65	0,82	0,87	0,90	0,89	157
15	4A180M4Y3	30,0	87,0	90,5	91,0	91,0	89,0	0,66	0,83	0,88	0,89	0,89	157
16	4A200M4Y3	37,0	87,0	90,5	91,0	91,0	90,5	0,67	0,84	0,89	0,90	0,90	157
17	4A200L4Y3	45,0	88,5	92,0	92,5	92,0	91,0	0,69	0,85	0,89	0,90	0,90	157
18	4A225M4Y3	55,0	88,5	92,0	92,5	92,5	91,5	0,68	0,84	0,89	0,90	0,90	157
19	4A250S4Y3	75,0	88,5	92,0	93,0	93,0	92,5	0,69	0,84	0,88	0,90	0,90	157
20	4A250M4Y3	90,0	89,0	92,5	93,0	93,0	92,0	0,73	0,87	0,90	0,91	0,90	157
21	4A160S6Y3	11,0	83,5	87,5	87,5	86,0	83,5	0,54	0,75	0,83	0,86	0,87	104,7
22	4A160M6Y3	15,0	85,0	88,5	88,5	87,5	85,0	0,55	0,76	0,84	0,87	0,87	104,7
23	4A180M6Y3	18,5	85,0	89,0	89,0	88,0	86,0	0,54	0,76	0,84	0,87	0,87	104,7
24	4A200M6Y3	22,0	87,5	91,0	91,0	90,0	88,0	0,68	0,84	0,88	0,90	0,90	104,7
25	4A200L6Y3	30,0	88,0	91,0	91,0	90,5	89,0	0,64	0,82	0,88	0,90	0,90	104,7

Коефіцієнт потужності дозволяє судити про спожиту електродвигуном реактивну потужність. Величина цих показників залежить як від завантаження, так і від режиму роботи електропривода. Важливо знати, як ці фактори впливають на енергетичні показники електропривода та які шляхи їх покращення.

В ЕП із перетворювачами на основі напівпровідникових приладів (наприклад, вентильний регульований ЕП) суттєвим показником є коефіцієнт спотворення K_c , який характеризує ступінь відхилення струму і напруги від синусоїдної форми і дорівнює відношенню діючого значення першої гармоніки струму до діючого значення несинусоїдального струму, тобто $K_c = \frac{I_1}{I}$.

Енергетичні показники ЕП суттєво залежать від режиму його роботи, характеру зміни моменту навантаження і способів регулювання координат. Звичайно енергетичні показники нерегульованого і регульованого ЕП визначають окремо при їх роботі в усталеному і перехідному режимах.

Потужність P_1 , споживана електроприводом з мережі, витрачається на: реалізацію руху виконавчого органу робочої машини (ВОРМ) $P_m = M_m \cdot \omega_m$; зміну запасу кінетичної і потенціальної енергії в механічній частині ЕП; зміну запасу електричної енергії (ЕЕ) в ємностях та індуктивностях електричної частини; розсіювання у вигляді теплоти. В теплоту перетворюються втрати: в обмотках електричного та електромеханічного перетворювачів і керуючих пристроїв; пов'язані з перемагнічуванням сталі; в ємностях; на тертя у механічній частині.

Економічність роботи ЕП в будь-якому режимі характеризується відношенням виконаної механічної роботи до кількості електроенергії, спожитої з мережі

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ел}}} = \frac{\int_0^{T_{\text{ц}}} M_m(t) \omega_m(t) dt}{\int_0^{T_{\text{ц}}} P_1 dt}, \quad (1)$$

де $\eta_{\text{ц}}$ – цикловий коефіцієнт корисної дії електропривода;

$A_{\text{мех}}, A_{\text{ел}}$ – відповідно корисна механічна робота і споживана з мережі електрична енергія;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість робочого циклу;

M_m – момент на валу робочої машини;

ω_m – кутова швидкість валу робочої машини;

P_1 – потужність, споживана електроприводом з мережі.

Якщо на окремих відрізках часу потужність стала, то ККД буде дорівнювати

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2)$$

де P_2 – потужність на валу електродвигуна.

При відомих значеннях ККД перетворювача електроенергії $\eta_{\text{п.ел}}$, двигуна $\eta_{\text{дв}}$ і механічних передач $\eta_{\text{мех}}$ вираз (2) буде мати такий вигляд

$$\eta = \eta_{\text{п.ел}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (3)$$

Кожна із складових загального ККД – величина не постійна, а залежить від навантаження кожного пристрою, швидкості та деяких інших факторів. Але нормативним параметром є номінальний ККД, який відповідає номінальному навантаженню і швидкості.

Коефіцієнт корисної дії є мірою економічності перетворення енергії системою електропривода.

В ЕП змінного струму присутня реактивна складова струму, яка не приймає безпосередньої участі у створенні активної потужності, але сприяє нагріванню ЕД і втратам в електричній мережі.

Економічність споживання електроенергії з мережі характеризується коефіцієнтом потужності, який є відношенням активної потужності P до повної потужності S

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (4)$$

Коефіцієнт потужності має важливе значення для економії електроенергії.

1 При однаковій активній потужності двигуни, які працюють з низьким $\cos \varphi$, споживають більший струм, що вимагає більшої потужності генератора і трансформатора

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}. \quad (5)$$

2 При малих значеннях $\cos \varphi$ збільшуються втрати енергії в проводах, а для збереження втрат незмінними необхідно збільшувати переріз проводів, бо згідно закону Джоуля-Ленца

$$\Delta P = 3I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 \cdot \frac{R}{\cos^2 \varphi} = \left(\frac{P}{U}\right)^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (6)$$

де ΔP – втрати потужності, Вт;
 R – опір проводу, Ом;
 ρ – питомий опір проводу, Ом·мм²/км;
 l – довжина лінії, км;
 S – площа поперечного перерізу проводів, мм².

З Низький $\cos \varphi$ є причиною зниження ККД двигуна.

Потужність втрат у нерегульованому електроприводі складається з потужності втрат у двигуні і механічній частині. Втрати потужності в механічній передачі $\Delta P_{\text{мех}}$ зумовлені в основному тертям у рухомих частинах. Ці втрати оцінюються величиною ККД, значення якого для різних видів передач і при різних навантаженнях є в довідковій літературі.

Відповідно до формули (2) ККД електродвигуна $\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1}$ – це відношення корисної механічної потужності на валу до електричної потужності на вході двигуна.

Втрати потужності у двигуні є сумою постійних ΔP_c і змінних ΔP_v втрат

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (7)$$

Під постійними втратами потужності розуміють втрати потужності, що не залежать від струму двигуна. До них належать: втрати в сталі магнітопровода, на тертя в підшипниках, вентиляційні, в провідниках обмоток збудження двигунів постійного струму та синхронних двигунів.

Під змінними втратами потужності розуміють такі, які виникають у провідниках обмоток двигуна під час протікання по них струму навантаження.

Змінні втрати потужності в трифазних асинхронних двигунах (АД) визначаються

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_{2\text{н}}'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma_{2\text{н}}^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2\text{н}}'} \right) = \Delta P_{\text{вн}} K_3^2, \quad (8)$$

де $\Delta P_{\text{вн}} = 3I_{2\text{н}}'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma^2} \right)$ – номінальні змінні втрати потужності;

$\sigma_{\text{н}} = \frac{I_{2\text{н}}'}{I_{1\text{н}}} \approx 0,85 \dots 0,95$, $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$ – відповідно номінальна і поточна кратності

зведеного струму ротора і статора.

Змінні втрати потужності у двигунах різних типів визначають за однако-
 вим виразом

$$\Delta P_v = \Delta P_{\text{вн}} K_3^2, \quad (9)$$

де $\Delta P_{\text{вн}}$ – змінні втрати при номінальному навантаженні;

$$K_3 = \frac{I}{I_{\text{н}}} - \text{коефіцієнт завантаження двигуна.}$$

Повні втрати потужності в двигуні

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{вн}} K_3^2 = \Delta P_{\text{вн}} \left(\frac{\Delta P_{\text{с}}}{\Delta P_{\text{вн}}} + K_3^2 \right) = \Delta P_{\text{вн}} (\alpha + K_3^2), \quad (10)$$

де $\alpha = \frac{\Delta P_{\text{с}}}{\Delta P_{\text{вн}}}$ – відношення постійних втрат потужності до номінальних змінних втрат, яке називається коефіцієнтом втрат.

Величина α залежить від номінальної потужності та кутової швидкості і для АД з короткозамкненим ротором знаходиться в межах $\alpha = 0,5 \dots 0,9$.

Втрати потужності під час роботи двигуна в номінальному режимі, коли $K_3 = 1$, знаходять за паспортними даними двигуна

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}. \quad (11)$$

Втрати потужності при холостому ході

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{н}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 1} = \frac{P_{\text{н}} \cdot \alpha \cdot (1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}} \cdot (\alpha + 1)}. \quad (12)$$

Повні втрати потужності при i -му навантаженні двигуна дорівнюють

$$\Delta P_i = P_i \cdot \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (13)$$

де η_i – ККД електродвигуна при навантаженні P_i .

Враховуючи, що під час роботи на природній характеристиці $K_3 = \frac{I}{I_{\text{н}}} \approx \frac{P}{P_{\text{н}}}$, то з урахуванням (10) ККД можна розрахувати за виразом

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{дв}}} = \frac{K_3}{K_3 + \frac{\Delta P_{\text{вн}}}{P_{\text{н}}} \cdot (\alpha + K_3^2)}. \quad (14)$$

В номінальному режимі $K_3 = 1$, тоді

$$\eta_{\text{H}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{vH}}}{P_{\text{H}}} \cdot (\alpha + 1)}. \quad (15)$$

Якщо за допомогою виразу (7) виключити з рівняння (15) P_{H} , то можна визначити ККД в загальному вигляді, де параметрами будуть α і η_{H}

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} \cdot \frac{\frac{\alpha}{K_3} + K_3}{\alpha + 1}}. \quad (16)$$

Залежність ККД від коефіцієнта завантаження має максимум при

$$K_{3 \text{ опт}} = \sqrt{\alpha}. \quad (17)$$

Максимальне значення ККД двигуна

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{vH}}}{\sqrt{\alpha} P_{\text{H}}}}. \quad (18)$$

Наприклад, якщо $\alpha = 1$, то ККД буде максимальним при $K_3 = 1$, що відповідає повному навантаженню. Якщо $\alpha = 0,5$, то $K_3 = \sqrt{0,5} = 0,71$, і відповідно крива ККД буде мати максимум при навантаженні двигуна, що дорівнює 71 % від номінального. З аналізу виразу (17) витікає, що максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому змінні і постійні втрати однакові. В довідниках та каталогах на АД наводять залежності $\eta = f(K_3)$ і $\cos \varphi = \psi(K_3)$ (рисунк 1). Для електродвигунів змінного струму $\cos \varphi$ є важливим енергетичним показником, який залежить від навантаження на валу двигуна і показує, яка частина повної електричної потужності, що надходить з мережі, перетворюється на активну потужність. Характер зміни цієї залежності показано на рисунку 1, б). При відсутності навантаження ($P_{\text{м}} = 0$) двигун споживає незначну активну потужність, яка практично дорівнює постійним втратам, і значну реактивну потужність, яка витрачається в основному на створення магнітного поля двигуна. В цьому випадку $\cos \varphi$ має невелике значення.

При збільшенні навантаження споживання реактивної потужності змінюється мало і тоді підвищується $\cos \varphi$. Подальше збільшення навантаження призводить до росту споживання реактивної потужності за рахунок магнітних потоків розсіювання, що призводить до зменшення $\cos \varphi$.

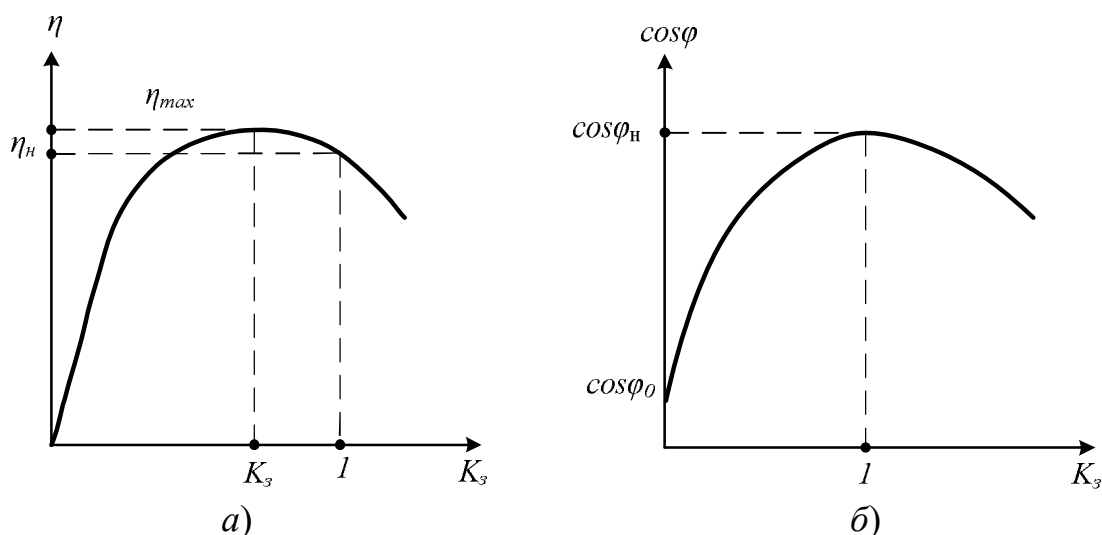


Рисунок 1 – Залежності ККД (а) і $\cos \varphi$ (б) від кратності навантаження двигуна

Для кращого використання електроенергії, зведення до мінімуму її втрат, досягнення максимального значення ККД двигуна в ustalених режимах електроприводів, кутова швидкість яких не регулюється, необхідно забезпечити номінальне завантаження та обмежити тривалість холостого ходу двигуна.

При наявності малозавантажених двигунів доцільно провести їх заміну на двигуни менших габаритів, потужність яких відповідає реальній потужності навантаження.

Розрахунки показують, що коли середнє навантаження двигуна складає менше 45 % його номінальної потужності, то заміна цього двигуна менш потужним завжди доцільна. При завантаженні двигунів більше 70 % номінальної потужності їх заміна взагалі недоцільна. Коли двигуни завантажені в межах 45...70 % доцільність їх заміни повинна бути визначена додатковими розрахунками.

Реактивна потужність, споживана асинхронним двигуном, пропорційна боковій поверхні ротора і величині повітряного зазору. Тому чим менший зазор і бокова поверхня ротора, тим вищий $\cos \varphi$. У потужних двигунах зазор відносно менший, ніж в малопотужних, тому вони мають вищий $\cos \varphi$. У високошвидкісних двигунах внаслідок зменшення полюсів бокова поверхня менша, ніж у тихохідних, відповідно ці двигуни мають вищий $\cos \varphi$.

На значення $\cos \varphi$ впливають коливання напруги. При повному завантаженні двигуна зниження напруги призведе до зниження $\cos \varphi$, а при неповному – підвищення $\cos \varphi$.

4 Приклад розрахунку

Для заданого електродвигуна розрахувати зміну основних енергетичних показників в функції навантаження на валу і побудувати його графік.

Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номінальна потужність, P_n , кВт	ККД, η , %, при коефіцієнті завантаження					Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, в.о., при коефіцієнті завантаження					Частота обертання, n_n , об/хв.
			0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	
30	4A280M6У3	90,0	90,0	93,0	93,0	92,5	91,0	0,67	0,83	0,87	0,89	0,88	985

4.1 Для заданого електродвигуна (ЕД) визначити і побудувати залежності: $\eta = f_1(P_2)$, $P_1 = f_2(P_2)$, $\Delta P = f_3(P_2)$, де η – коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна, в.о., P_2 – потужність на валу електродвигуна, кВт; P_1 – спожита з мережі потужність, кВт; ΔP – втрати потужності в електродвигуні, кВт.

Для заданих значень коефіцієнта завантаження двигуна (таблиця 3) з таблиці 2 вносимо вихідні дані і проводимо розрахунок параметрів.

Таблиця 3 – Вихідні дані і результати розрахунків

№ завантаження	Параметри						
	Коефіцієнт завантаження, K_3 , в.о.	ККД, η , в.о.	Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$, в.о.	Потужність на валу, P_2 , кВт	Спожита потужність, P_1 , кВт	Втрати потужності, ΔP , кВт	Реактивна потужність, Q , кВар
1	0,125	0,800	-	11,25	14,06	2,81	-
2	0,250	0,900	0,67	22,5	25,00	2,5	27,7
3	0,500	0,930	0,83	45,0	48,39	3,39	32,52
4	0,750	0,930	0,87	67,5	72,58	5,08	41,13
5	1,000	0,925	0,89	90,0	97,3	7,3	49,85
6	1,250	0,910	0,88	112,5	123,63	11,13	66,73

ККД електродвигуна визначаємо за формулою

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{\frac{\alpha}{K_3} + K_3}{\alpha + 1}},$$

де η_n – номінальний ККД електродвигуна, який відповідає $K_3 = 1$;
 α – коефіцієнт втрат, $\alpha = 0,5 - 0,7$. Приймаємо $\alpha = 0,6$;
 K_3 – коефіцієнт завантаження.

Розрахуємо коефіцієнт корисної дії електродвигуна при значеннях коефіцієнта завантаження $K_3 = 0,125$

$$\eta_{0,125} = \frac{1}{1 + \frac{1 - 0,925}{0,925} \cdot \frac{\frac{0,6}{0,125} + 0,125}{0,6 + 1}} = 0,800.$$

Потужність на валу електродвигуна P_2 , кВт, знайдемо з формули

$$K_3 = \frac{P_2}{P_n},$$

де P_2 – потужність на валу електродвигуна, кВт;
 P_n – номінальна потужність електродвигуна, кВт.
Звідки

$$P_2 = K_3 \cdot P_n.$$

Розрахуємо потужність на валу двигуна P_2 при значеннях коефіцієнта завантаження $K_3 = 0,125; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$.

$$\text{При } K_3 = 0,125 \quad P_{2(0,125)} = 0,125 \cdot 90 = 11,25 \text{ кВт.}$$

$$\text{При } K_3 = 0,25 \quad P_{2(0,25)} = 0,25 \cdot 90 = 22,5 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунків потужності на валу електродвигуна P_2 при інших значеннях коефіцієнта завантаження K_3 зводимо в таблицю 3.

Спожиту з мережі потужність визначаємо за формулою

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}.$$

При $K_3 = 0,125$ потужність на валу двигуна складає $P_{2(0,125)} = 11,25$ кВт, а ККД $\eta_{(0,125)} = 0,800$. Отже, спожита з мережі потужність $P_{1(0,125)}$ дорівнює

$$P_{1(0,125)} = \frac{11,25}{0,8} = 14,06 \text{ кВт.}$$

При $K_3 = 0,25$ потужність на валу двигуна складає $P_{2(0,25)} = 22,5$ кВт, а ККД $\eta_{(0,25)} = 0,9$. Отже, спожита з мережі потужність $P_{1(0,25)}$ дорівнює

$$P_{1(0,25)} = \frac{22,5}{0,9} = 25,0 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунків спожитої з мережі потужності P_1 при інших значеннях K_3 , потужності на валу двигуна і ККД зводимо в таблицю 3.

Втрати потужності в електродвигуні знаходимо за формулою

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

або

$$\Delta P = P_2 \cdot \frac{1 - \eta}{\eta}.$$

При $K_3 = 0,125$ потужність на валу двигуна складає $P_{2(0,125)} = 11,25$ кВт, а ККД $\eta_{(0,125)} = 0,800$. Отже, втрати потужності $\Delta P_{(0,125)}$ складають

$$\Delta P_{(0,125)} = 11,25 \cdot \frac{1 - 0,8}{0,8} = 2,81 \text{ кВт.}$$

При $K_3 = 0,25$ потужність на валу двигуна складає $P_{2(0,25)} = 22,5$ кВт, а ККД $\eta_{(0,25)} = 0,9$. Отже, втрати потужності $\Delta P_{(0,25)}$ складають

$$\Delta P_{(0,25)} = 22,5 \cdot \frac{1 - 0,9}{0,9} = 2,5 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунків втрат потужності ΔP при інших значеннях K_3 , потужності на валу двигуна і ККД зводимо в таблицю 3.

За результатами розрахунків будуємо залежності: $\eta = f_1(P_2)$, $P_1 = f_2(P_2)$, $\Delta P = f_3(P_2)$ (рисунок 2).

4.2 За даними таблиці 3 будуємо залежність $\cos \varphi = f_4(P_2)$ (рисунок 2). Для $K_3 = 0,125$ коефіцієнт потужності не визначаємо.

4.3 Визначити і побудувати залежність $Q = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi$.

Реактивну потужність визначаємо за формулою

$$Q = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

де

$$\varphi = \arccos \cos \varphi.$$

Отже

$$Q = P_1 \cdot \operatorname{tg}(\arccos \cos \varphi).$$

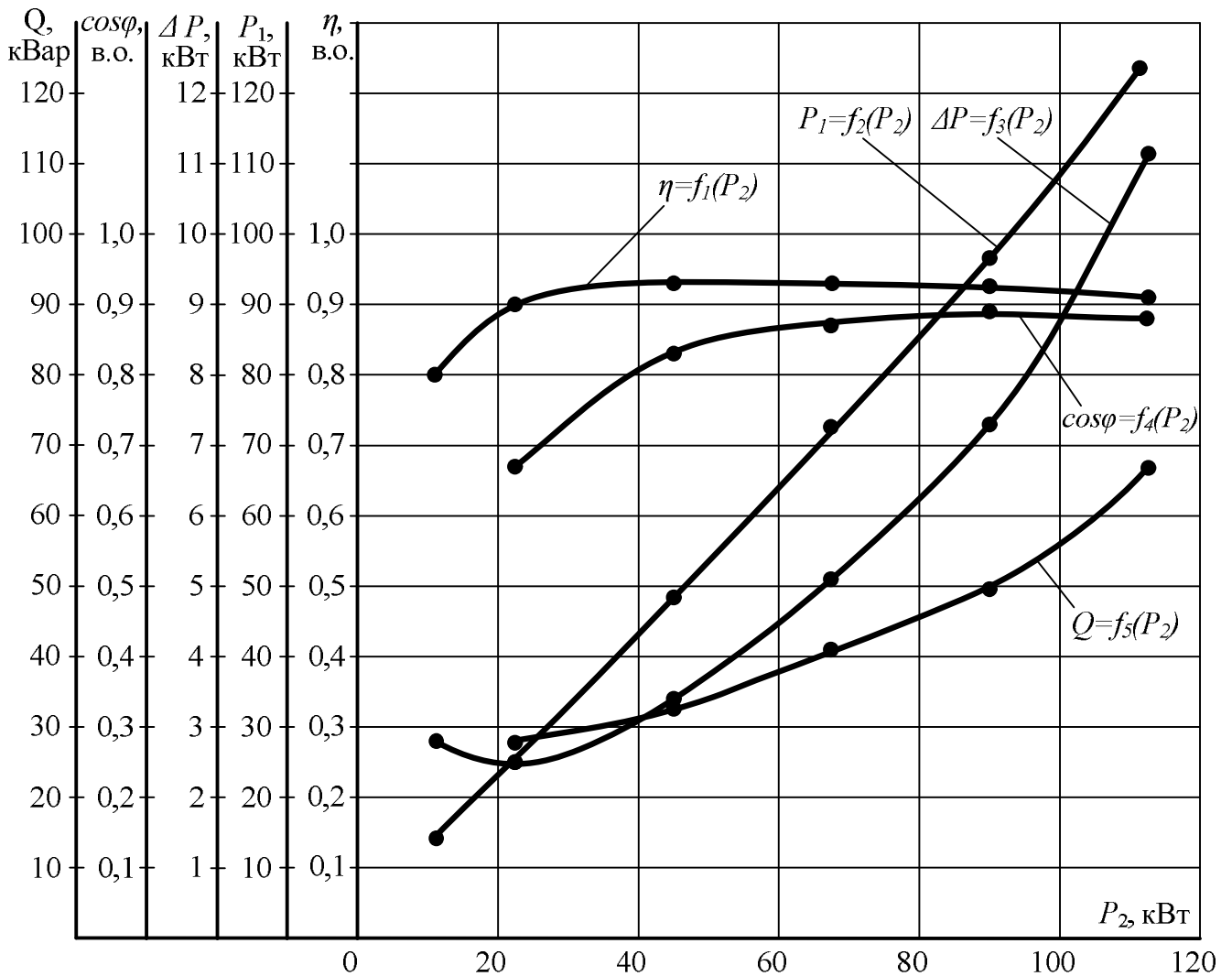


Рисунок 2 – Залежності $\eta = f_1(P_2)$, $P_1 = f_2(P_2)$, $\Delta P = f_3(P_2)$, $\cos \varphi = f_4(P_2)$, $Q = f_5(P_2)$

Визначимо реактивну потужність при $K_3 = 0,25$. Для цього коефіцієнта завантаження коефіцієнт потужності дорівнює $\cos \varphi_{(0,25)} = 0,67$. Отже

$$\begin{aligned} Q_{(0,25)} &= P_{1(0,25)} \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi_{(0,25)}) = 25,0 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,67) = \\ &= 25,0 \cdot 1,1080 = 27,7 \text{ кВар.} \end{aligned}$$

Результати розрахунків реактивної потужності Q при інших значеннях коефіцієнта навантаження, спожитої потужності і $\operatorname{tg} \varphi$ зводимо в таблицю 3.

4.4 Зробити висновки, що свідчать про зміну параметрів електродвигуна від зміни навантаження на валу: $\eta = f_1(P_2)$, $\Delta P = f_2(P_2)$, $P_1 = f_3(P_2)$, $\cos \varphi = f_4(P_2)$, $Q = f_5(P_2)$.

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Таблиці з результатами розрахунків.
- 4 Побудовані графічно залежності: $\eta = f_1(P_2)$, $\Delta P = f_2(P_2)$,
 $P_1 = f_3(P_2)$, $\cos \varphi = f_4(P_2)$, $Q = f_5(P_2)$.
- 5 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Назвіть основні енергетичні показники електропривода.
- 2 Чим характеризується економічність роботи електропривода?
- 3 Як визначається цикловий ККД електропривода?
- 4 Що таке постійні і змінні втрати потужності в електроприводі?
- 5 Як знайти втрати потужності при номінальному режимі двигуна?
- 6 Як змінюються величини ККД і $\cos \varphi$ від відносного навантаження?
- 7 Вкажіть шляхи зменшення втрат енергії в електроприводах.

РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику визначення втрат потужності та енергії в електроприводах (ЕП) з асинхронними двигунами з фазним ротором.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: втрати потужності в електроприводах з асинхронними двигунами з фазним ротором при роботі на природній та штучній механічних характеристиках [1, с. 261-263; 4, с. 145-153; 11, с. 303-305; 27].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: втрати енергії в електроприводах з асинхронними двигунами з фазним ротором при різних способах пуску [1, с. 264-271; 2, с. 158-161; 3, с. 341-348; 4, с. 155-161; 11, с. 307-311; 27].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для асинхронного електродвигуна з фазним ротором розрахувати втрати потужності в колах статора і ротора АД при роботі на природній механічній характеристиці. При цьому прийняти $\frac{R_1}{R'_2} = 1$.

2.2 Розрахувати втрати потужності в колах статора і ротора АД при роботі на штучній механічній характеристиці із швидкістю обертання $n_{шт} = 0,5n_n$ і номінальному навантаженні на валу двигуна.

2.3 Розрахувати втрати енергії в статорній і роторній обмотках асинхронного двигуна при його пуску вхолосту від промислової частоти. При розрахунках прийняти $\frac{R_1}{R'_2} = 1$.

2.4 Розрахувати втрати енергії в асинхронному електродвигуні з фазним ротором при пуску з введенням в коло ротора додаткових опорів.

3 Загальні відомості і рекомендації

Енергетична сторона електропривода відіграє суттєву роль як в прийнятті остаточного рішення по вибору того або іншого типу електропривода, так і при оцінці проектного рішення.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електро-двигуна	P_H , кВт	U_{1H} , В	J , кг·м ²	I_{2H} , А	E_{2K} , В	μ_K , в.о.	S_H , %	S_K , %
1	4AK160S4Y3	11,0	380	0,1	22	305	3,0	4,4	33,0
2	4AK160M4Y3	14,0	380	0,13	29	300	3,5	3,7	32,1
3	4AK180M4Y3	18,5	380	0,23	38	295	4,0	2,9	31,1
4	4AK200M4Y3	22,0	380	0,37	45	340	4,0	2,5	22,0
5	4AK200L4Y3	30,0	380	0,45	55	350	4,0	2,5	22,0
6	4AK225M4Y3	37,0	380	0,64	160	160	3,0	3,5	20,0
7	4AK250SA4Y3	45,0	380	1,0	170	230	3,0	3,0	20,5
8	4AK250SB4Y3	55,0	380	1,1	170	200	3,0	2,3	19,6
9	4AK250M4Y3	71,0	380	1,2	170	250	3,0	2,5	19,5
10	4AK160M6Y3	10,0	380	0,18	20	310	3,8	4,3	27,1
11	4AK180M6Y3	13,0	380	0,22	25	325	4,0	4,4	29,1
12	4AK200M6Y3	18,5	380	0,4	35	360	3,5	3,5	27,5
13	4AK200L6Y3	22,0	380	0,45	45	330	3,5	3,5	21,0
14	4AK225M6Y3	30,0	380	0,74	150	140	2,5	3,5	19,5
15	4AK250S6Y3	37,0	380	1,16	165	150	2,5	3,5	18,0
16	4AK250M6Y3	45,0	380	1,26	160	180	2,5	2,5	17,0
17	4AK160S8Y3	5,5	380	0,14	14	300	2,5	6,4	29,0
18	4AK160M8Y3	7,1	380	0,18	6	290	3,0	5,5	23,2
19	4AK180M8Y3	11,0	380	0,25	25	270	3,5	4,4	22,7
20	4AK200M8Y3	15,0	380	0,4	28	360	3,0	3,5	23,0
21	4AK200L8Y3	18,5	380	0,61	40	300	3,0	3,5	21,5
22	4AK225M8Y3	22,0	380	0,74	140	102	2,2	4,5	19,5
23	4AK250S8Y3	30,0	380	1,2	155	125	2,2	4,0	20,0
24	4AK250M8Y3	37,0	380	1,4	155	148	2,2	3,5	18,5
25	4АНК160M4Y3	17,0	380	0,13	34	315	3,5	4,1	32,3

Процес електромеханічного перетворення енергії в ЕП завжди супроводжується втратами електричної енергії (потужності) в дисипативних елементах, в якості яких в електроприводі виступають активні опори в силових колах і колах керування, а також в додатково включених в електричні кола елементів; в механічній частині – це тертя в елементах кінематичного кола.

Оцінка цих властивостей електропривода здійснюється за допомогою так званих енергетичних показників, до числа яких відносяться коефіцієнт корисної дії (ККД) η , коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, втрати потужності ΔP та втрати енергії ΔA . Іноді до цих показників відносять спожиті з мережі корисну потужність та енергію.

Енергетичні показники ЕП суттєво залежать від режиму його роботи, характеру зміни моменту навантаження і способів регулювання координат. Звичайно енергетичні показники нерегульованого і регульованого ЕП визначають окремо при їх роботі в усталеному і перехідному режимах.

Потужність втрат в двигуні $\Delta P_{\text{дв}}$ складається з механічних $\Delta P_{\text{дв. мех}}$ і електричних $\Delta P_{\text{дв. ел}}$ втрат

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{дв. мех}} + \Delta P_{\text{дв. ел}} \quad (1)$$

Електричні втрати залежать від навантаження і відносяться до змінних ΔP_v , механічні втрати (в сталі, підшипниках, вентиляційні) не залежать від навантаження і є постійними ΔP_c .

Для асинхронних двигунів змінні втрати дорівнюють сумі втрат в обмотках статора і обмотках ротора

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_2'^2 R_2' \left(1 + \frac{I_1^2 R_1}{I_2'^2 R_2'} \right) = 3I_2'^2 R_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2' \sigma^2} \right), \quad (2)$$

де $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$ – поточна кратність приведенного струму ротора до струму статора.

Змінні втрати, відмінні від номінальних втрат, можна виразити через номінальні змінні втрати

$$\Delta P_{\text{вн}} = 3I_{2\text{н}}'^2 R_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2' \sigma_{\text{н}}^2} \right), \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{н}} = \frac{I_{2\text{н}}'}{I_{1\text{н}}} \approx 0,85 - 0,95$ – номінальна кратність приведенного струму ротора до струму статора.

Змінні втрати потужності в асинхронному двигуні при $M_c = 0$ мають дві складові: втрати в обмотці статора і втрати в обмотці ротора і можуть бути виражені також через електромагнітний момент і відносну швидкість (або ковзання)

$$\Delta P_v = 3I_2'^2 R_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2' \sigma^2} \right) \approx 3I_2'^2 R_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = M \omega_0 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (4)$$

Пускові втрати енергії в асинхронному двигуні можна визначити за формулою

$$\Delta A_{\text{п}} = \int_0^{t_{\text{п}}} 3I_2'^2 (R_1 + R_2' + R_{2\text{доб}}') dt. \quad (5)$$

При $M_c = 0$

$$dt = - \left(\frac{J \omega_0}{M} \right) dS. \quad (6)$$

Виразивши втрати потужності в роторному колі через потужність ковзання, тобто

$$3I_2' (R_2' + R_{2\text{доб}}') = M \omega_0 S \quad (7)$$

в результаті перетворення можна отримати

$$\Delta A_{\text{п}} = \int_{S_{\text{кін}}}^{S_{\text{поч}}} J \omega_0^2 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right) dS. \quad (8)$$

Враховуючи, що при пуску двигуна ковзання змінюється від $S_{\text{поч}} = 1$ до $S_{\text{кін}} = 0$, тоді

$$\Delta A_{\text{п}0} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right), \quad (9)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість двигуна, рад/с;

$R_1, R_2', R_{2\text{доб}}'$ – відповідно опір обмотки статора, приведений до кола статора опір кола ротора і опір додаткового резистора в колі ротора (для двигуна з короткозамкненим ротором $R_{2\text{доб}}' = 0$).

Отже, аналізуючи рівняння (9), можна зробити висновок, що втрати енергії при пуску складаються:

– з втрат в роторному колі $\Delta A_{\text{п02}} = J \frac{\omega_0^2}{2}$, які визначаються запасом кінетичної енергії, яку набуває привод до кінця пуску;

– з втрат в статорному колі $\Delta A_{\text{п01}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'}$, які залежать від ак-

тивних опорів статора і роторного кола; чим більший опір роторного кола, тим менші втрати в статорі асинхронного двигуна. Зменшення втрат в статорі із зростом вторинного опору пояснюється зменшенням пускового струму.

Для двигуна з короткозамкненим ротором $R_{2\text{доб}}' = 0$, отже втрати енергії в статорі дорівнюють

$$\Delta A_{\text{п01}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{R_1}{R_2'} \quad (10)$$

4 Приклад розрахунку

Асинхронний двигун з фазним ротором типу 4АК160S6У3 має наступні паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{н}} = 7,5$ кВт; номінальне ковзання $S_{\text{н}} = 0,051$; критичне ковзання $S_{\text{к}} = 0,301$; електрорушійна сила (ЕРС) ротора $E_{2\text{к}} = 300$ В; кратність критичного моменту $\mu_{\text{к}} = 3,5$; номінальний струм ротора $I_{2\text{н}} = 18$ А; номінальна напруга $U_{1\text{н}} = 380$ В; кількість полюсів $2p = 6$; коефіцієнт $\alpha = \frac{R_1}{R_2'} = 1$; момент інерції електродвигуна $J = 0,14$ кг·м².

4.1 Розрахувати втрати потужності в колах статора і ротора АД при роботі на природній механічній характеристиці. При цьому прийняти $\frac{R_1}{R_2'} = 1$.

Визначаємо змінні втрати потужності при роботі двигуна на природній характеристиці за формулою

$$\Delta P_{\text{н}} = M_{\text{н}} \cdot \omega_0 \cdot S_{\text{н}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right),$$

де $M_{\text{н}}$ – номінальний момент електродвигуна, Н·м;

ω_0 – синхронна кутова швидкість двигуна, рад/с;

$S_{\text{н}}$ – номінальне ковзання, в.о.;

R_1 – активний опір обмотки статора, Ом;

R_2' – приведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора, Ом.

Згідно паспортних даних виходить, що втрати потужності в колах статора і ротора однакові, так як $\frac{R_1}{R'_2} = 1$.

Визначаємо номінальний момент електродвигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H},$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт;

ω_H – номінальна кутова швидкість, рад/с.

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H),$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$$\omega_H = 104,7 \cdot (1 - 0,051) = 99,4 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{99,4} = 75,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta P_H = 75,5 \cdot 104,7 \cdot 0,051 \cdot (1 + 1) = 806,3 \text{ Вт}.$$

4.2 Розрахувати втрати потужності в колах статора і ротора АД при роботі на штучній механічній характеристиці із швидкістю обертання $n_{\text{шт}} = 0,5n_H$ і номінальному навантаженні на валу двигуна.

Визначаємо змінні втрати потужності при роботі двигуна на реостатній (штучній) характеристиці при номінальному навантаженні на валу і швидкості обертання двигуна $n_{\text{шт}} = 0,5n_H$ об/хв. за формулою

$$\Delta P_{\text{шт}(R)} = M_H \cdot \omega_0 \cdot S_{\text{шт}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_{2\Sigma}} \right),$$

де $S_{\text{н шт}}$ – номінальне ковзання на штучній (реостатній) характеристиці, в.о.;
 $R'_{2\Sigma}$ – приведений до обмотки статора повний опір кола ротора, Ом.
 Визначаємо ковзання на штучній механічній характеристиці

$$S_{\text{н шт}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{шт}}}{\omega_0},$$

де $\omega_{\text{шт}}$ – кутова швидкість на реостатній характеристиці, рад/с.

$$\omega_{\text{шт}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{шт}}}{30},$$

де $n_{\text{шт}}$ – частота обертання двигуна на реостатній характеристиці, об/хв.
 Згідно завдання $n_{\text{шт}} = 0,5n_{\text{н}}$.

$$n_{\text{н}} = \frac{30 \cdot \omega_{\text{н}}}{\pi};$$

$$\omega_{\text{шт}} = \frac{\pi \cdot 0,5n_{\text{н}}}{30} = \frac{\pi \cdot 0,5 \cdot \frac{30 \cdot \omega_{\text{н}}}{\pi}}{30} = 0,5\omega_{\text{н}};$$

$$\omega_{\text{шт}(R)} = 0,5 \cdot 99,4 = 49,7 \text{ рад/с};$$

$$S_{\text{н шт}(R)} = \frac{104,7 - 49,7}{104,7} = 0,53.$$

Зведений до обмотки статора повний опір кола ротора дорівнює

$$R'_{2\Sigma} = R_{2\Sigma} \cdot K_E^2,$$

де $R_{2\Sigma}$ – повний активний опір кола ротора, Ом;
 K_E – коефіцієнт трансформації електрорушійної сили (ЕРС), в.о.

$$R_{2\Sigma} = R_2 + R_{2\text{д}},$$

де R_2 – активний опір обмотки ротора, Ом;
 $R_{2\text{д}}$ – величина додаткового опору у колі ротора, Ом.

$$R_2 = \frac{E_{2\text{к}} \cdot S_{\text{н пр}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{н}}},$$

де $E_{2к}$ – електрорушійна сила (ЕРС) між кільцями нерухомого ротора, В. Згідно паспортних даних $E_{2к} = 300$ В;

$S_{нпр}$ – номінальне ковзання на природній характеристиці, в.о.;

$I_{2н}$ – номінальний струм ротора. Згідно паспортних даних $I_{2н} = 18$ А.

$$R_2 = \frac{300 \cdot 0,051}{18 \cdot \sqrt{3}} = 0,49 \text{ Ом.}$$

Визначимо величину додаткового опору в колі ротора. З формули для розрахунку номінального ковзання електродвигуна на реостатній (штучній) характеристиці

$$S_{ншт(R)} = S_{нпр} \cdot \frac{R_2 + R_{2д}}{R_2}$$

визначаємо величину додаткового опору

$$R_{2д} = R_2 \cdot \left(\frac{S_{ншт(R)}}{S_{нпр}} - 1 \right);$$

$$R_{2д} = 0,49 \cdot \left(\frac{0,53}{0,051} - 1 \right) = 4,6 \text{ Ом;}$$

$$R_{2\Sigma} = 0,49 + 4,6 = 5,09 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт трансформації електрорушійної сили (ЕРС) K_E можна обчислити за паспортними даними двигуна за виразом

$$K_E = 0,95 \cdot \frac{U_{1н}}{E_{2к}},$$

де 0,95 – коефіцієнт, який враховує 5 % -у втрату напруги в обмотці статора;
 $U_{1н}$ – номінальна лінійна напруга статора, В.

$$K_E = 0,95 \cdot \frac{380}{300} = 1,2;$$

$$R'_{2\Sigma} = 5,09 \cdot 1,2^2 = 7,33 \text{ Ом.}$$

Так як відношення опорів $\frac{R_1}{R'_2} = 1$, активний опір статора дорівнює зведеному опору ротора

$$R_1 = R'_2 = R_2 \cdot K_E^2;$$

$$R_1 = R'_2 = 0,49 \cdot 1,2^2 = 0,71 \text{ Ом};$$

$$\Delta P_{\text{шт}(R)} = 75,5 \cdot 104,7 \cdot 0,53 \cdot \left(1 + \frac{0,71}{7,33}\right) = 4595,4 \text{ Вт.}$$

Отже, номінальні змінні втрати потужності в асинхронному електродвигуні дорівнюють 806,3 Вт; номінальні змінні втрати потужності при роботі двигуна на реостатній характеристиці складають 4595,4 Вт.

4.3 Розрахувати втрати енергії в статорній і роторній обмотках асинхронного двигуна при його пуску вхолосту від промислової частоти. При розрахунках прийняти $\frac{R_1}{R'_2} = 1$.

Втрати енергії в асинхронному електродвигуні з фазним ротором при пуску вхолосту ($S_{\text{поч}} = 1, S_{\text{кін}} = 0$) визначаємо за формулою

$$\Delta A_{\text{п}} = J \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right),$$

де J – момент інерції двигуна, кг·м².

$$\Delta A_{\text{п}} = 0,14 \cdot \frac{104,7^2}{2} \cdot (1+1) = 1534,7 \text{ Дж.}$$

4.4 Розрахувати втрати енергії в асинхронному електродвигуні з фазним ротором при пуску з введенням в коло ротора додаткових опорів.

При пуску двигуна з фазним ротором з введенням в коло ротора додаткових опорів втрати енергії визначаємо за формулою

$$\Delta A_{\text{п}(R)} = J \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_{2\Sigma}}\right);$$

$$\Delta A_{\text{п}(R)} = 0,14 \cdot \frac{104,7^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,71}{7,33}\right) = 841,7 \text{ Дж.}$$

Отже, втрати енергії при пуску вхолосту складають 1534,7 Дж; а при пуску з введенням в коло ротора додаткових опорів втрати енергії становлять 841,7 Дж.

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Назвіть основні енергетичні показники електропривода.
- 2 Чим характеризується економічність роботи електропривода в будь-якому режимі?
- 3 Назвіть складові енергетичних втрат в електроприводі.
- 4 Що розуміють під постійними втратами потужності в електроприводі?
- 5 Що розуміють під змінними втратами потужності в електроприводі?
- 6 Як за паспортними даними двигуна визначити втрати потужності під час роботи його в номінальному режимі?
- 7 Як визначити втрати потужності при холостому ході двигуна?
- 8 Як визначити повні втрати потужності при і-тому навантаженні двигуна?
- 9 Які втрати в асинхронному двигуні відносяться до постійних втрат потужності в регульованому електроприводі з асинхронним електродвигуном?
- 10 Як визначити номінальні змінні втрати потужності в асинхронному двигуні?
- 11 Як визначити змінні втрати потужності в асинхронному двигуні при роботі на реостатній (штучній) характеристиці?
- 12 Як визначити повні втрати енергії в асинхронному двигуні?
- 13 Чим характеризуються втрати енергії в роторному колі асинхронного електродвигуна?
- 14 Поясніть причину зниження втрат в обмотці статора при введенні активного опору резистора в коло обмотки ротора.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку втрат енергії при перехідних процесах в електроприводах змінного струму з можливістю енергозбереження.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: перехідні режими в приводах з асинхронними двигунами, аналітичне визначення часу перехідного процесу пуску і електричного гальмування [1, с. 136-141; 2, с. 148-152; 3, с. 291-298; 5, с. 121-127; 28].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах [1, с. 264-271; 2, с. 158-161; 3, с. 332-348; 4, с. 155-161; 28].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 1.

2 Програма роботи

2.1 Для одношвидкісного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором:

2.1.1 визначити втрати енергії при пуску при відсутності навантаження на валу. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}}$;

2.1.2 визначити енергозберігаючий спосіб гальмування. Для цього:

– визначити втрати енергії при гальмуванні противмиканням асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором;

– визначити втрати енергії при динамічному гальмуванні, яке здійснюється постійним струмом, який перевищує номінальний струм електродвигуна в два рази.

2.2 Для тришвидкісного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором визначити енергозберігаючий спосіб пуску. Для цього:

2.2.1 визначити втрати енергії при прямому пуску тришвидкісного електродвигуна. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}}$;

2.2.2 визначити втрати енергії при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна на вищу швидкість;

2.2.3 визначити ефект енергозбереження при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна на вищу швидкість.

Таблиця 1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номінальна потужність, $P_{\text{н}}$, кВт	Момент інерції ротора двигуна, $4J_{\text{р.д.}}$, кг·м ²	Наведений опір фази обмотки, в.о.		Приведений головний індуктивний опір X_{μ}^* , в.о.	Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора X_2^* , в.о.
				статора R_1^*	ротора R_2^*		
1	4A132M2Y3	11	0,023	0,040	0,025	4,2	0,12
2	4A160S2Y3	15	0,048	0,052	0,022	4,0	0,12
3	4A160M2Y3	18,5	0,053	0,049	0,022	4,5	0,12
4	4A180S2Y3	22	0,070	0,039	0,020	3,6	0,11
5	4A180M2Y3	30	0,085	0,030	0,018	3,8	0,11
6	4A200M2Y3	37	0,150	0,029	0,021	4,1	0,12
7	4A200L2Y3	45	0,170	0,027	0,002	4,9	0,13
8	4A225M2Y3	55	0,250	0,026	0,019	5,6	0,12
9	4A250S2Y3	75	0,470	0,021	0,015	4,8	0,13
10	4A250M2Y3	90	0,520	0,020	0,016	5,2	0,13
11	4A132M4Y3	11	0,040	0,043	0,032	3,2	0,13
12	4A160S4Y3	15	0,100	0,047	0,025	4,0	0,13
13	4A160M4Y3	18,5	0,130	0,042	0,024	4,3	0,13
14	4A180S4Y3	22	0,190	0,041	0,021	4,0	0,12
15	4A180M4Y3	30	0,230	0,034	0,018	3,9	0,12
16	4A200M4Y3	37	0,370	0,039	0,018	4,4	0,14
17	4A200L4Y3	45	0,450	0,034	0,017	4,6	0,14
18	4A225M4Y3	55	0,640	0,027	0,015	4,2	0,14
19	4A250S4Y3	75	1,000	0,025	0,014	4,4	0,11
20	4A250M4Y3	90	1,200	0,024	0,014	5,0	0,12
21	4A160S6Y3	11	0,140	0,073	0,030	3,0	0,15
22	4A160M6Y3	15	0,180	0,062	0,028	3,0	0,16
23	4A180M6Y3	18,5	0,220	0,056	0,026	2,9	0,13
24	4A200M6Y3	22	0,400	0,050	0,024	4,1	0,14
25	4A200L6Y3	30	0,450	0,046	0,022	3,7	0,13

Таблиця 2 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	S_n , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{р.д.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
1	4A100S6/4/2Y3	6	1	69,0	0,6	3,2	0,11	0,066	0,0092
		4	1,1	66,0	0,76	2,2	0,26	0,061	
		2	1,5	67,0	0,90	3,0	0,13	0,088	
2	4A100L6/4/2Y3	6	1,4	69,0	0,62	3,1	0,10	0,062	0,012
		4	1,5	71,0	0,76	2,2	0,23	0,057	
		2	2,1	72	0,90	2,8	0,11	0,034	
3	4A112M6/4/2Y3	6	1,6	71,0	0,76	3,2	0,15	0,071	0,017
		4	2,2	76,0	0,84	5,5	0,20	0,110	
		2	2,8	71	0,90	4,4	0,11	0,052	
4	4A132S6/4/2Y3	6	2,8	76,5	0,76	4,5	0,12	0,060	0,028
		4	3,6	79,5	0,85	3,4	0,16	0,070	
		2	4,2	71,5	0,90	3,7	0,082	0,045	
5	4A132M6/4/2Y3	6	3,8	78,5	0,76	4,2	0,093	0,056	0,040
		4	5,0	81,0	0,87	3,4	0,15	0,069	
		2	6,0	76,0	0,90	3,3	0,075	0,039	
6	4A160S6/4/2Y3	6	4,8	79,5	0,82	2,7	0,11	0,032	0,11
		4	5,3	81,0	0,85	1,5	0,15	0,032	
		2	7,5	76,0	0,92	2,5	0,9	0,028	
7	4A160M6/4/2Y3	6	6,7	85,1	0,80	2,7	0,10	0,033	0,14
		4	7,5	83,0	0,86	1,8	0,15	0,035	
		2	10,5	78,5	0,93	2,5	0,089	0,027	
8	4A100S8/4/2Y3	8	0,63	58,0	0,59	4,5	0,15	0,11	0,0092
		4	1,1	66,0	0,76	2,2	0,26	0,061	
		2	1,5	67,0	0,90	3,0	0,13	0,038	
9	4A100L8/4/2Y3	8	0,9	66,0	0,64	5,3	0,14	0,098	0,012
		4	1,5	71,0	0,76	2,2	0,22	0,057	
		2	2,1	72,0	0,90	2,8	0,11	0,034	
10	4A112M8/4/2Y3	8	1,1	65	0,68	6,4	0,17	0,11	0,017
		4	1,9	72,5	0,85	3,6	0,23	0,076	
		2	2,2	67,5	0,90	3,5	0,12	0,043	

Продовження таблиці 2

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	S_n , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{р.д.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
11	4A132S8/4/2У3	8	1,8	70,0	0,65	4,5	0,097	0,066	0,028
		4	3,0	77,5	0,82	2,0	0,170	0,045	
		2	3,6	69,0	0,87	1,3	0,095	0,018	
12	4A132M8/4/2У3	8	2,4	72,5	0,66	4,5	0,11	0,075	0,040
		4	4,5	79,5	0,82	2,1	0,15	0,044	
		2	5,0	71,5	0,87	1,2	0,076	0,016	
13	4A160S8/4/2У3	8	3,8	76,0	0,72	3,3	0,12	0,051	0,11
		4	4,25	81,5	0,84	1,8	0,15	0,028	
		2	6,3	76,5	0,93	2,3	0,093	0,025	
14	4A160M8/4/2У3	8	5,0	78,0	0,71	3,6	0,12	0,047	0,14
		4	7,1	84,5	0,87	1,4	0,14	0,034	
		2	9,5	80,5	0,93	2,4	0,082	0,026	
15	4A100S8/6/4У3	8	0,75	59,0	0,62	3,7	0,30	0,014	0,012
		6	0,9	65,0	0,71	3,1	0,17	0,053	
		4	1,3	69,0	0,82	5,30	0,16	0,066	
16	4A100L8/6/4У3	8	0,9	61,0	0,63	3,5	0,28	0,13	0,015
		6	1,2	68,0	0,71	3,0	0,15	0,05	
		4	1,7	71,0	0,83	4,9	0,15	0,06	
17	4A112MA8/6/4У3	8	1,1	65,0	0,69	6,4	0,20	0,079	0,017
		6	1,0	62,0	0,77	5,3	0,30	0,088	
		4	1,5	72,0	0,89	6,8	0,14	0,076	
18	4A112MB8/6/4У3	8	1,4	63,5	0,69	6,3	0,18	0,076	0,021
		6	1,2	68,5	0,77	5,2	0,49	0,31	
		4	2,1	71,0	0,89	7,8	0,15	0,083	
19	4A132S8/6/4У3	8	1,9	69,5	0,72	5,3	0,15	0,049	0,04
		6	2,2	73,5	0,77	3,8	0,29	0,014	
		4	3,2	74,0	0,90	6,8	0,15	0,069	
20	4A132M8/6/4У3	8	2,6	72,5	0,72	4,5	0,13	0,047	0,058
		6	2,8	75,0	0,78	3,3	0,21	0,11	
		4	4,5	77,5	0,90	5,4	0,12	0,057	

Продовження таблиці 2

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	S_n , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{р.д.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
21	4A160S8/6/4УЗ	8	4,0	74,5	0,63	1,3	0,20	0,042	0,15
		6	4,5	76,0	0,75	1,1	0,12	0,016	
		4	7,5	80,5	0,90	1,8	0,10	0,019	
22	4A160M8/6/4УЗ	8	5,0	76,5	0,62	1,3	0,18	0,041	0,2
		6	6,3	77,0	0,73	1,0	0,12	0,015	
		4	10,0	82,0	0,90	1,7	0,10	0,017	
23	4A180M8/6/4УЗ	8	8,0	78,0	0,73	1,4	0,16	0,035	0,28
		6	10,0	83,5	0,81	1,2	0,075	0,015	
		4	12,5	83,5	0,92	1,6	0,079	0,018	
24	4A200M8/6/4УЗ	8	11	82,0	0,69	1,5	0,14	0,018	0,52
		6	12	82,5	0,79	1,1	0,086	0,014	
		4	18,5	85,0	0,91	1,6	0,076	0,017	
25	4A200L8/6/4УЗ	8	14,0	83,0	0,70	1,5	0,14	0,038	0,58
		6	15,0	85,5	0,81	1,2	0,076	0,014	
		4	21,0	85,5	0,92	1,4	0,066	0,015	

3 Загальні відомості і рекомендації

Перехідні процеси в електроприводі відбуваються при переході з одного усталеного стану до іншого, коли змінюються швидкість, струм, момент, температура електродвигуна. Перехідні процеси виникають в будь-якій системі електропривода при його пуску, гальмуванні, реверсуванні та регулюванні швидкості, зміні навантаження на робочому органі, коливанні напруги або частоти мережі живлення, тобто під впливом зовнішніх збурюючих факторів. Реакція привода на збурюючий вплив складає сутність перехідних процесів.

Перехідні процеси в електроприводах обумовлені наявністю механічної, електромагнітної і теплової інерційностей. В рухомих частинах накопичується кінетична енергія, в пружних елементах – потенціальна, в індуктивностях – електромагнітна, в масі двигуна – тепла. Відсутність інерційностей виключило би протікання перехідних процесів. При стрибкоподібному збурюючому впливі відбувалося би миттєва зміна швидкості, моменту двигуна, струму та інших величин.

В залежності від виду енергії, яка обумовлює перехідні процеси, розрізняють механічні, електромагнітні та теплові процеси.

Механічні перехідні процеси пов'язані із зміною кінетичної енергії. Електромагнітні перехідні процеси виникають при зміні електромагнітної енергії в обмотках електричних машин. Теплові перехідні процеси обумовлені зміною теплової енергії в електричній машині.

Для дослідження перехідного процесу необхідно скласти диференціальне рівняння, рішення якого опише поведінку системи як в перехідному, так і в усталеному режимі роботи при заданих початкових і кінцевих умовах.

Перехідні процеси в електроприводах з трифазними асинхронними електродвигунами можна описати, використовуючи основне рівняння руху електропривода

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (1)$$

де M – рушійний момент, Н·м;

M_c – момент статичних опорів, Н·м;

J – момент інерції системи, кг·м²;

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення, рад/с².

Для заміни кутової швидкості ковзанням продиференціюємо рівняння

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S) \quad (2)$$

та отримаємо

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (3)$$

Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді

$$M - M_c = -J\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (4)$$

При перехідних процесах в електроприводах з трифазними асинхронними електродвигунами з урахуванням кривизни механічної характеристики, яка описується формулою Клосса або спрощеною формулою Клосса, за умови, що $M_c = 0$ основне рівняння руху можна записати у вигляді

$$\frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

З урахуванням рівняння (3) рівняння (5) можна записати у вигляді

$$\frac{2M_{\kappa}}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S}} = -J\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (6)$$

Звідки

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_{\kappa}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS = -\frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS, \quad (7)$$

де $T_{\text{м}} = \frac{J\omega_0}{M_{\kappa}}$ – електромеханічна стала часу.

Електромеханічна стала часу – це час, за який система з моментом інерції J розганяється з нерухомого стану до швидкості ідеального холостого ходу ω_0 під дією моменту, що дорівнює максимальному моменту двигуна M_{κ} .

Час перехідних процесів пуску привода при зміні ковзання від $S_{\text{поч}}$ до $S_{\text{кін}}$ можна знайти проінтегрувавши вираз (7)

$$t_{\text{по}} = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \int_{S_{\text{кін}}}^{S_{\text{поч}}} \left(\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{S_{\text{поч}}^2 - S_{\text{кін}}^2}{2S_{\kappa}} + S_{\kappa} \ln \frac{S_{\text{поч}}}{S_{\text{кін}}} \right). \quad (8)$$

Оскільки при пуску двигуна з нерухомого стану $S_{\text{поч}} = 1$, то

$$t_{\text{по}} = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{1 - S_{\text{кін}}^2}{2S_{\kappa}} + S_{\kappa} \ln \frac{1}{S_{\text{кін}}} \right). \quad (9)$$

Оскільки при кутовій швидкості $\omega = (0,95 \dots 0,98)\omega_0$ розгін вважається закінченим, то можна прийняти $\omega_{\text{кін}} = 0,05$ і тривалість пуску без навантаження можна визначити

$$t_{\text{по}} = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{1 - 0,05^2}{2S_{\kappa}} + S_{\kappa} \ln \frac{1}{0,05} \right). \quad (10)$$

Величиною $0,05^2$, як дуже малою у порівнянні з одиницею, у першому члені можна знехтувати, тоді

$$t_{\text{по}} = T_{\text{м}} \cdot \left(\frac{1}{4S_{\kappa}} + 1,5S_{\kappa} \right). \quad (11)$$

Отже, час пуску залежить від критичного ковзання двигуна, яке прямо

пропорційно опорів роторного кола.

Гальмування противмиканням до зупинки ротора або для реверсування здійснюють перемиканням двох фаз статора двигуна. Час гальмування без навантаження від $S_{\text{поч}} = 2$ до $S_{\text{кін}} = 1$ визначається за виразом

$$t_{\text{г.пр.о}} = T_{\text{м}} \cdot \left(\frac{0,75}{S_{\text{к}}} + 0,346S_{\text{к}} \right). \quad (12)$$

Для динамічного гальмування найчастіше обмотку статора двигуна вмикають з мережі змінного струму і вмикають в коло постійного струму. Оскільки при динамічному гальмуванні $S = \frac{\omega}{\omega_0}$, то ковзання двигуна при гальмуванні без навантаження змінюється від $S_{\text{поч}} = 1$ до $S_{\text{кін}} = 0$. Отже, час гальмування визначається за виразом

$$t_{\text{г.д.о}} = T_{\text{м}} \cdot \left(\frac{1}{4S_{\text{к.д.}}} + 1,5S_{\text{к.д.}} \right), \quad (13)$$

де $S_{\text{к.д.}}$ – критичне ковзання на гальмівній характеристиці;

$$T_{\text{м}} = \frac{J\omega_0}{M_{\text{к.д.}}} \text{ – електромеханічна стала при динамічному гальмуванні.}$$

Процес електромеханічного перетворення енергії в електроприводі завжди супроводжується втратами електричної енергії (потужності) в дисипативних елементах, в якості яких в електроприводі виступають активні опори в силових колах і колах керування, а також в додатково включених в електричні кола елементах, в механічній частині – це тертя в елементах кінематичного кола.

Оцінка цих властивостей електропривода здійснюється за допомогою енергетичних показників, до яких відносяться коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$), втрати потужності ΔP та енергії ΔA . Іноді до цих показників відносять спожиті з мережі корисну потужність і енергію.

Співвідношення величин спожитої з мережі електроенергії, механічної енергії на валу двигуна і значення втрат і визначають ККД і коефіцієнт потужності. Ці показники широко використовують як при створенні нових, так і при оцінці роботи діючих електроприводів.

Визначення енергетичних показників роботи ЕП в перехідних режимах є не менш важливою задачею, ніж для усталеного режиму роботи. Визначається це у першу чергу тим, що у перехідних режимах струми в обмотках двигуна значно перевищують номінальні значення і спричиняють підвищення втрат

енергії, чим суттєво впливають на нагрівання двигуна.

У загальному випадку втрати енергії за час перехідного процесу можуть бути визначені за виразом

$$\Delta A = \int_0^t \Delta P dt = \int_0^t (\Delta P_c + \Delta P_v) dt = \int_0^t \Delta P_c dt + \int_0^t \Delta P_v dt = \Delta A_c + \Delta A_v, \quad (14)$$

де ΔA_c , ΔA_v – відповідно постійні та змінні втрати енергії.

До постійних відносять втрати в сталі ΔP_c , механічні $\Delta P_{\text{мех}}$ і додаткові $\Delta P_{\text{дод}}$. Змінні втрати – це втрати потужності в колі статора

$$\Delta P_1 = 3I_1^2 R_1 \quad (15)$$

і в колі ротора

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2', \quad (16)$$

де I_1 , I_2' – відповідно струм обмотки статора і приведений струм обмотки ротора;
 R_1 , R_2' – відповідно опір обмотки статора і приведений опір кола ротора.

При відсутності моменту опору на валу електродвигуна, виразивши втрати потужності в роторному колі через потужність ковзання, тобто

$$3I_2'^2 R_2' = M \omega_0 S,$$

і з урахуванням (4) отримаємо втрати енергії при перехідних процесах в асинхронному електроприводі

$$\Delta A_0 = \int_0^{t_{\text{п}}} M \omega_0 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) dt = \int_{S_{\text{кін}}}^{S_{\text{поч}}} J \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) S dS \quad (17)$$

або

$$\Delta A_0 = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot (S_{\text{поч}}^2 - S_{\text{кін}}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (18)$$

При пуску двигуна ковзання змінюється від $S_{\text{поч}} = 1$ до $S_{\text{кін}} = 0$, тоді

$$\Delta A_{\text{п0}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \quad (19)$$

де $J \frac{\omega_0^2}{2}$ – втрати енергії в роторному колі, що визначаються запасом кінетич-

ної енергії, яку набуває механічна система до кінця пуску;

$$J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{R_1}{R_2'} - \text{втрати енергії в обмотці статора.}$$

При гальмуванні двигуна, що обертається вхолосту, способом противмикання ковзання змінюється від $S_{\text{пюч}} = 2$ до $S_{\text{кін}} = 1$, тоді втрати енергії становлять

$$\Delta A_{\text{г.пр.0}} = 3J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = 3\Delta A_{\text{п0}}. \quad (20)$$

При гальмуванні противмиканням втрати енергії втричі більші, ніж втрати енергії при пуску.

Втрати енергії при динамічному гальмуванні визначаються за виразом

$$\Delta A_{\text{г.д.}} = \Delta A_{\text{г.д.01}} + \Delta A_{\text{г.д.02}}, \quad (21)$$

де $\Delta A_{\text{г.д.01}}$ – втрати енергії в обмотці статора, Дж;

$\Delta A_{\text{г.д.02}}$ – втрати енергії у колі ротора, Дж.

Втрати енергії в колі ротора асинхронного двигуна при динамічному гальмуванні без навантаження визначаються запасом кінетичної енергії маховими масами ротора перед початком гальмування

$$\Delta A_{\text{г.д.02}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (22)$$

а в обмотках статора

$$\Delta A_{\text{г.д.01}} = 3I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1 \cdot t_{\text{г.д.}}. \quad (23)$$

де $I_{\text{екв}}$ – еквівалентний струм статора, А;

R_1 – опір обмотки статора електродвигуна, Ом;

$t_{\text{г.д.}}$ – час динамічного гальмування електродвигуна, с.

4 Приклад розрахунку

4.1 Для одношвидкісного електродвигуна з паспортними даними (таблиця 1) визначити енергозберігаючий спосіб гальмування.

4.1.1 Визначити втрати енергії при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при відсутності навантаження на валу. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д.}}$.

Таблиця 3 – Вихідні дані за варіантом індивідуального завдання (з таблиці 1)

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номінальна потужність $P_{\text{н}}$, кВт	Момент інерції ротора електродвигуна $4J_{\text{р.д.}}$, кг·м ²	Наведений опір фази обмотки, в.о.		Приведений головний індуктивний опір X_{μ}^* , в.о.	Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора X_2^* , в.о.
				статора R_1^*	ротора R_2^*		
30	4A250M6У3	55	1,3	0,034	0,014	3,4	0,13

Втрати енергії при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при відсутності моменту опору на валу електродвигуна (пуск вхолосту) визначається за виразом

$$\Delta A_{\text{п}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1'^*}{R_2'^*} \right),$$

де $J_{\text{пр}}$ – приведений момент інерції, кг·м². Згідно завдання $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}}$;

ω_0 – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля статора, рад/с;

$R_1'^*$, $R_2'^*$ – відповідно приведені опори фази обмоток статора і ротора, в.о.

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

$$\text{Для електродвигуна 4A250M6У3 } p = \frac{2p}{2} = \frac{6}{2} = 3.$$

Отже,

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_{\text{п}} = 4 \cdot 1,3 \cdot \frac{104,67^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,034}{0,014} \right) = 97663 \text{ Дж .}$$

4.1.2 Визначити втрати енергії при гальмуванні противмиканням асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Втрати енергії при гальмуванні противмиканням асинхронного електрод-

вигуна з короткозамкненим ротором дорівнюють

$$\Delta A_{\text{г.пр}} = 3J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} = 3\Delta A_{\text{н}};$$

$$\Delta A_{\text{г.пр}} = 3 \cdot 97663 = 292989 \text{ Дж}.$$

4.1.3 Визначити втрати енергії при динамічному гальмуванні, яке здійснюється постійним струмом, який перевищує номінальний струм електродвигуна в два рази.

Втрати енергії при динамічному гальмуванні визначаються за виразом

$$\Delta A_{\text{г.д.}} = \Delta A_{\text{г.д.01}} + \Delta A_{\text{г.д.02}},$$

де $\Delta A_{\text{г.д.01}}$ – втрати енергії в обмотці статора, Дж;

$\Delta A_{\text{г.д.02}}$ – втрати енергії у колі ротора, Дж.

Втрати енергії у колі ротора визначаються за формулою

$$\Delta A_{\text{г.д.02}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta A_{\text{г.д.02}} = 1,3 \cdot 4 \cdot \frac{104,67^2}{2} = 28485 \text{ Дж}.$$

Втрати енергії в обмотці статора при протіканні постійного струму збудження по двом обмоткам статора визначаються за виразом

$$\Delta A_{\text{д.г.01}} = I_{\text{д.г.}}^2 \cdot 2 \cdot R_1 \cdot t_{\text{г.д.}},$$

де $I_{\text{д.г.}}$ – постійний струм при динамічному гальмуванні, А, який, згідно завдання, перевищує номінальний струм електродвигуна в два рази

$$I_{\text{д.г.}} = 2I_{1\text{н}};$$

R_1 – опір обмотки статора електродвигуна, Ом;

$t_{\text{г.д.}}$ – час динамічного гальмування електродвигуна, с.

Номінальний струм електродвигуна визначаємо за формулою

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$U_{1\phi}$ – номінальна фазна напруга, В;

$\cos \varphi_H$ – номінальний коефіцієнт потужності електродвигуна, в.о.;

η_H – номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна, в.о.

$$I_{1H} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,915} = 102,3 \text{ А};$$

$$I_{д.г.} = 2 \cdot 102,3 = 204,6 \text{ А}.$$

Значення приведенного опору фази обмотки статора перераховуємо в іменовані одиниці за допомогою формули

$$R_1 = R_1'^* \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}};$$

$$R_1 = 0,034 \cdot \frac{220}{102,3} = 0,07 \text{ Ом}.$$

Час динамічного гальмування визначаємо за формулою

$$t_{г.д} = T_M \cdot \left(1,5 \cdot S_{к.г.д} + \frac{1}{4 \cdot S_{к.г.д}} \right),$$

де T_M – електромеханічна постійна часу електродвигуна, с;

$S_{к.г.д}$ – критичне ковзання при динамічному гальмуванні, в.о.

Електромеханічна постійна часу електродвигуна визначається за формулою

$$T_M = \frac{J_{пр} \cdot \omega_0}{M_{к.г.д}},$$

де $M_{к.г.д}$ – критичний момент ЕД при динамічному гальмуванні, Н·м.

Критичний момент електродвигуна при динамічному гальмуванні визначаємо за формулою

$$M_{к.г.д.} = \frac{3 \cdot I_{екв}^2 \cdot x_\mu'^* \cdot U_{1\phi}}{2 \cdot \omega_0 \cdot (x_\mu'^* + x_2'^*) \cdot I_{1H}},$$

де $I_{екв}$ – змінний струм, еквівалентний постійному $I_{д.г.}$ за величиною створюю-

ваного магнітного поля, А. Приймаємо $I_{\text{екв}} = 0,816 \cdot I_{\text{д.г.}}$ при схемі обмоток «зірка» і підключенні постійного струму до двох фаз;
 x'_{μ}, x'_2 – відповідно приведений індуктивний опір кола намагнічування і приведений опір обмотки ротора, в.о.

$$I_{\text{екв}} = 0,816 \cdot 204,6 = 167 \text{ А};$$

$$M_{\text{к.г.д.}} = \frac{3 \cdot 167^2 \cdot 3,4^2 \cdot 220}{2 \cdot 104,67 \cdot (3,4 + 0,13) \cdot 102,3} = 2814,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$T_{\text{м}} = \frac{4 \cdot 1,3 \cdot 104,67}{2814,7} = 0,19 \text{ с.}$$

Критичне ковзання при динамічному гальмуванні визначаємо за формулою

$$S_{\text{к.г.д.}} = \frac{R_2'^*}{x'_{\mu} + x_2'^*};$$

$$S_{\text{к.г.д.}} = \frac{0,014}{3,4 + 0,13} = 0,004 \text{ в.о.};$$

$$t_{\text{г.д.}} = 0,19 \cdot \left(1,5 \cdot 0,004 + \frac{1}{4 \cdot 0,004} \right) = 11,9 \text{ с};$$

$$\Delta A_{\text{д.г.01}} = 204,6^2 \cdot 2 \cdot 0,07 \cdot 11,9 = 69740,7 \text{ Дж};$$

$$\Delta A_{\text{г.д.}} = 69741 + 28485 = 98226 \text{ Дж};$$

$$\Delta A_{\text{г.пр}} = 292989 \text{ Дж} > \Delta A_{\text{г.д.}} = 98226 \text{ Дж}.$$

4.2 Для тришвидкісного електродвигуна з паспортними даними (таблиця 4) визначити енергозберігаючі умови пуску.

Таблиця 4 – Вихідні дані за варіантом індивідуального завдання (з таблиці 2)

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	$P_{\text{н}}$, кВт	$\eta_{\text{н}}$, %	$\cos \varphi_{\text{н}}$, в.о.	$S_{\text{н}}$, %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{\text{р.д.}}$, кг·м ²
							$R_1'^*$	$R_2'^*$	
30	4A250M8/6/4У3	8	25	86,5	0,71	0,9	0,096	0,022	1,9
		6	28	87,5	0,82	0,8	0,054	0,01	
		4	37	86,5	0,9	0,9	0,049	0,01	

4.2.1 Визначити втрати енергії при прямому пуску тришвидкісного електродвигуна відразу на вищу швидкість. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}}$.

При прямому пуску тришвидкісного електродвигуна відразу на вищу швидкість втрати енергії визначаються за формулою

$$\Delta A_{\text{прям}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_{03}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R'_{1.03}}{R'_{2.03}} \right),$$

де ω_{03} – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля при найменшій кількості полюсів, рад/с. Індекс «03» означає третю, найвищу швидкість.

Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 найменша кількість полюсів $p = \frac{2p}{2} = \frac{4}{2} = 2$.

Отже,

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_{\text{прям}} = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{157^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,049}{0,01} \right) = 552630 \text{ Дж .}$$

4.2.2 Визначити втрати енергії при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна спочатку на нижчу швидкість, потім на середню, і нарешті, на вищу швидкість.

Втрати енергії при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна спочатку на нижчу швидкість, потім на середню, і нарешті, на вищу швидкість обертання визначаємо за формулою

$$\Delta A_{\text{ступ}} = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3.$$

На першій ступені пуску втрати енергії складуть

$$\Delta A_1 = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_{01}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R'_{1.01}}{R'_{2.01}} \right).$$

Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 кутова швидкість при нижчій швидкості обертання при $p = \frac{2p}{2} = \frac{8}{2} = 4$ дорівнює

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{4} = 78,5 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_1 = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{78,5^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,096}{0,022} \right) = 125513 \text{ Дж.}$$

На другій ступені пуску втрати енергії складуть

$$\Delta A_2 = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\Delta \omega_{02}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_{1.02}^*}{R_{2.02}^*} \right).$$

На другій ступені пуску початкова кутова швидкість ω_{01} , а кінцева – ω_{02} . Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 кутова швидкість при середній швидкості обертання при $p = \frac{2p}{2} = \frac{6}{2} = 3$ дорівнює

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ рад/с.}$$

Зміна швидкості обертання буде дорівнювати

$$\Delta \omega_{02} = \omega_{02} - \omega_{01};$$

$$\Delta \omega_{02} = 104,67 - 78,5 = 26,17 \text{ рад/с;}$$

$$\Delta A_2 = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{26,17^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,054}{0,01} \right) = 16656 \text{ Дж.}$$

На третій ступені пуску втрати енергії складуть

$$\Delta A_3 = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\Delta \omega_{03}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_{1.03}^*}{R_{2.03}^*} \right).$$

На третій ступені пуску початкова кутова швидкість ω_{02} , а кінцева – ω_{03} . Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 кутова швидкість при вищій швидкості обертання при $p = \frac{2p}{2} = \frac{4}{2} = 2$ дорівнює

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с.}$$

Зміна швидкості обертання буде дорівнювати

$$\Delta \omega_{03} = \omega_{03} - \omega_{02};$$

$$\Delta\omega_{03} = 157 - 104,67 = 52,33 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_3 = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{52,33^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,049}{0,01} \right) = 61396 \text{ Дж ;}$$

$$\Delta A_{\text{ступ}} = 125513 + 16656 + 61396 = 203565 \text{ Дж .}$$

4.2.3 Визначити ефект енергозбереження при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна на вищу швидкість.

$$\Delta A_{\text{прям}} = 552630 \text{ Дж} > \Delta A_{\text{ступ}} = 203565 \text{ Дж} .$$

Втрати енергії при прямому пуску електродвигуна 4А250М8/6/4У3 відразу на вищу швидкість обертання в 2,7 рази перевищують втрати енергії при ступінчастому пуску.

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Назвіть основні енергетичні показники електропривода.
- 2 Чому визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах є не менш важливою задачею, ніж для усталеного режиму роботи?
- 3 Як можуть бути визначені у загальному випадку втрати енергії за час перехідного процесу?
- 4 Що таке постійні та змінні втрати потужності в електроприводі?
- 5 Як визначається величина постійних втрат енергії при незмінному значенні постійних втрат потужності за час перехідного процесу?
- 6 Які фактори впливають на величину втрат енергії в перехідних режимах?
- 7 Яке співвідношення між втратами енергії при пуску двигуна без навантаження і при динамічному гальмуванні?
- 8 Наведіть вирази для визначення втрат енергії при гальмуванні протиставленням і реверсі.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЗАМІНІ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА РЕГУЛЬОВАНИЙ З ТРИШВИДКІСНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку економії електроенергії від застосування тришвидкісного електродвигуна в порівнянні з нерегульованим електродвигуном вентилятора.

1 Завдання для самостійної підготовки

1.1 Опрацювати теоретичний матеріал: механічні характеристики асинхронних двигунів та робочих машин [1, с. 31-34, 87-91; 5, с. 91-100; 12, с. 6-11; 29].

1.2 Опрацювати теоретичний матеріал: регулювання подачі вентиляційних установок [12, с. 64-69; 13, с. 54-58; 29].

1.3 Відповісти на контрольні питання.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці 2 практичної роботи «Енергозбереження при перехідних процесах в електродвигунах змінного струму» (с. 198-200).

2 Програма роботи

2.1 Побудувати робочі частини механічних характеристик тришвидкісного електродвигуна.

2.2 Побудувати механічну характеристику вентилятора і визначити спожиту потужність при трьох швидкостях обертання електродвигуна.

2.3 Прийняти середній закон розподілення часу роботи вентилятора на трьох швидкостях. Визначити час роботи електродвигуна на кожній швидкості, спожиту енергію на кожній швидкості обертання і сумарну витрату енергії за рік.

2.4 Визначити спожиту потужність при регулюванні подачі повітря засувкою при кожній з трьох подач, відповідних швидкостям обертання ω_1 , ω_2 і ω_3 тришвидкісного електродвигуна.

2.5 Визначити спожиту електроенергію за рік при регулюванні подачі повітря засувкою.

2.6 Визначити економію електроенергії в кВт·год. і у відсотках при регулюванні подачі тришвидкісним електродвигуном в порівнянні з регулюванням подачі повітря засувкою.

3 Загальні відомості і рекомендації

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту статичних опорів, які вона створює, від кутової швидкості приводного вала $M_c = f(\omega)$. Механічні характеристики машин і механізмів дають можливість вибрати електродвигун за пусковими властивостями, розв'язувати рівняння руху графічним способом, дослідити перехідні процеси в електроприводах, визначити час пуску і гальмування, втрати енергії при пуску, гальмуванні, регулюванні частоти обертання.

Момент статичних опорів вентилятора пропорційний квадрату кутової швидкості, а механічна характеристика вентилятора описується рівнянням

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x, \quad (1)$$

де M_c – момент статичних опорів вентилятора, Н·м, при кутовій швидкості ω , рад/с;

M_0 – момент статичних опорів, який не залежить від частоти обертання, обумовлений силами тертя, Н·м;

$M_{сн}$ – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості ω_H , Н·м;

x – показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту опору при зміні кутової швидкості. Для вентилятора $x = 2$.

У виробничих умовах виникає необхідність за допомогою певних пристроїв без зупинки вентиляційної установки змінювати подачу вентилятора. При цьому зміняться тиск, що розвиває вентилятор, споживана приводним двигуном потужність та коефіцієнт корисної дії.

Досить поширеним способом регулювання параметрів вентиляційної установки є дроселювання, тобто встановлення перед вентилятором або за ним засувки, що частково перекриває повітропровід. При цьому збільшується коефіцієнт місцевих втрат. Регулювання вентиляційної установки за допомогою засувки є неекономічним, тому що викликає зниження коефіцієнта корисної дії.

Регулювати тиск чи подачу вентиляційної установки можна вмиканням на один повітропровід двох вентиляторів меншої потужності. Вентилятори можна з'єднувати паралельно і послідовно. При послідовному з'єднанні вентиляторів один з них може регулюватись дроселюванням аж до повного перекривання. Енергетичні показники установки будуть вищі, ніж при дроселюванні одного ізольованого вентилятора.

В умовах сільськогосподарського виробництва найчастіше регулювання параметрів вентилятора здійснюють зміною частоти обертання. Для цього ви-

користують дво- і тришвидкісні двигуни (припливні системи вентиляції) та регулювання частоти обертання спеціальних двигунів зміною напруги на статорі. При використанні багатшвидкісних двигунів частота обертання визначається кількістю пар полюсів

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - S), \quad (2)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів;

S – ковзання, в.о.

При зміні частоти обертання n вентилятора продуктивність Q , повний тиск H , потужність P та коефіцієнт корисної дії η змінюються за залежностями, які справедливі при незмінному діаметрі робочого колеса вентилятора і незмінній густині повітря.

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{n}{n'}; \quad \frac{H}{H'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2; \quad \frac{P}{P'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3; \quad \frac{\eta}{\eta'} = 1. \quad (3)$$

Потужність двигуна при зміні частоти обертання змінюється за кубічною залежністю. У двигунів серії АІ є виконання для привода робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою. Характерною ознакою цих двигунів є те, що потужність у них на вищій частоті обертання значно більша за потужність на нижчій частоті обертання. Для двигунів з числом полюсів 4/2, 8/4 діапазон регулювання становить 1:2. При такому діапазоні регулювання потужність на вищій частоті обертання визначається залежністю

$$P_{\text{вищ}} = P_{\text{ниж}} \cdot \left(\frac{n_{\text{вищ}}}{n_{\text{ниж}}}\right)^3 = P_{\text{ниж}} \cdot 2^3 = 8P_{\text{ниж}}. \quad (4)$$

Для двигунів з числом полюсів 8/6 діапазон регулювання дорівнює 1:1,33. Потужність на вищій частоті обертання визначається залежністю

$$P_{\text{вищ}} = P_{\text{ниж}} \cdot \left(\frac{n_{\text{вищ}}}{n_{\text{ниж}}}\right)^3 = P_{\text{ниж}} \cdot 1,33^3 = 2,35P_{\text{ниж}}. \quad (5)$$

При зміні числа пар полюсів змінюється частота обертання приводного двигуна (вентилятора). Перевагою цього метода регулювання є відсутність втрат на регулювання та збереження жорсткості механічних характеристик. До

недоліків можна віднести ступінчасте регулювання продуктивності вентилятора та погіршення техніко-економічних показників в області малих ковзань.

Якщо за технологією роботи робочої машини важко встановити тривалість роботи регульованого електропривода на кожній ступені швидкості, то зручно звернутися до імовірних законів зміни швидкості обертання в діапазоні регулювання, графічні залежності яких представлені на рисунку 1 у відносних одиницях.

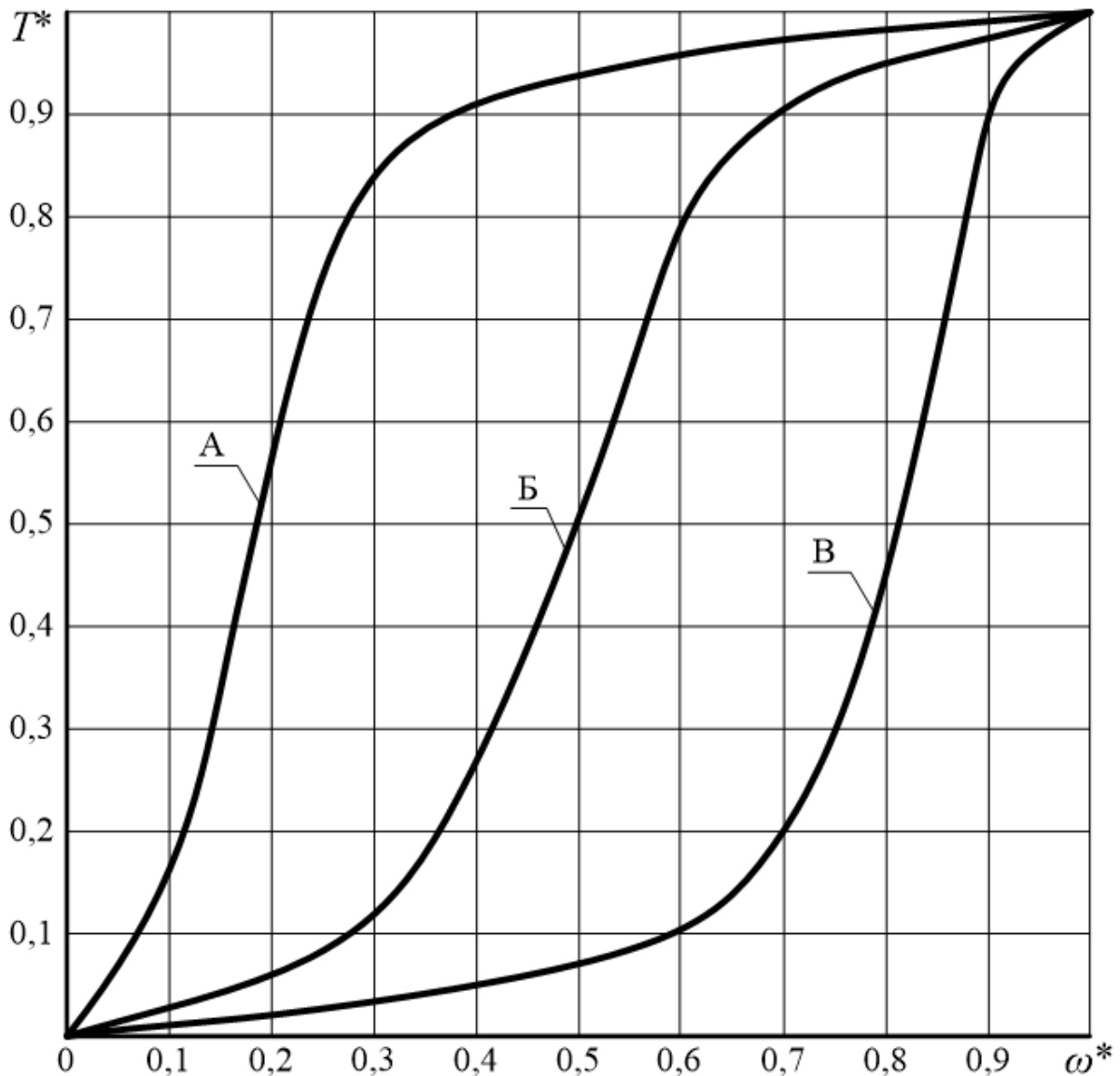


Рисунок 1 – Розподілення часу роботи робочої машини в інтервалі регулювання швидкості обертання: А – з переважанням часу на нижчих швидкостях обертання; Б – із середнім часом роботи на нижчих і високих швидкостях обертання; В – з переважанням часу роботи на високих швидкостях обертання

Зміна спожитої потужності від продуктивності вентилятора у відносних одиницях при регулюванні подачі засувкою на трубопроводі представлена на рисунку 2.

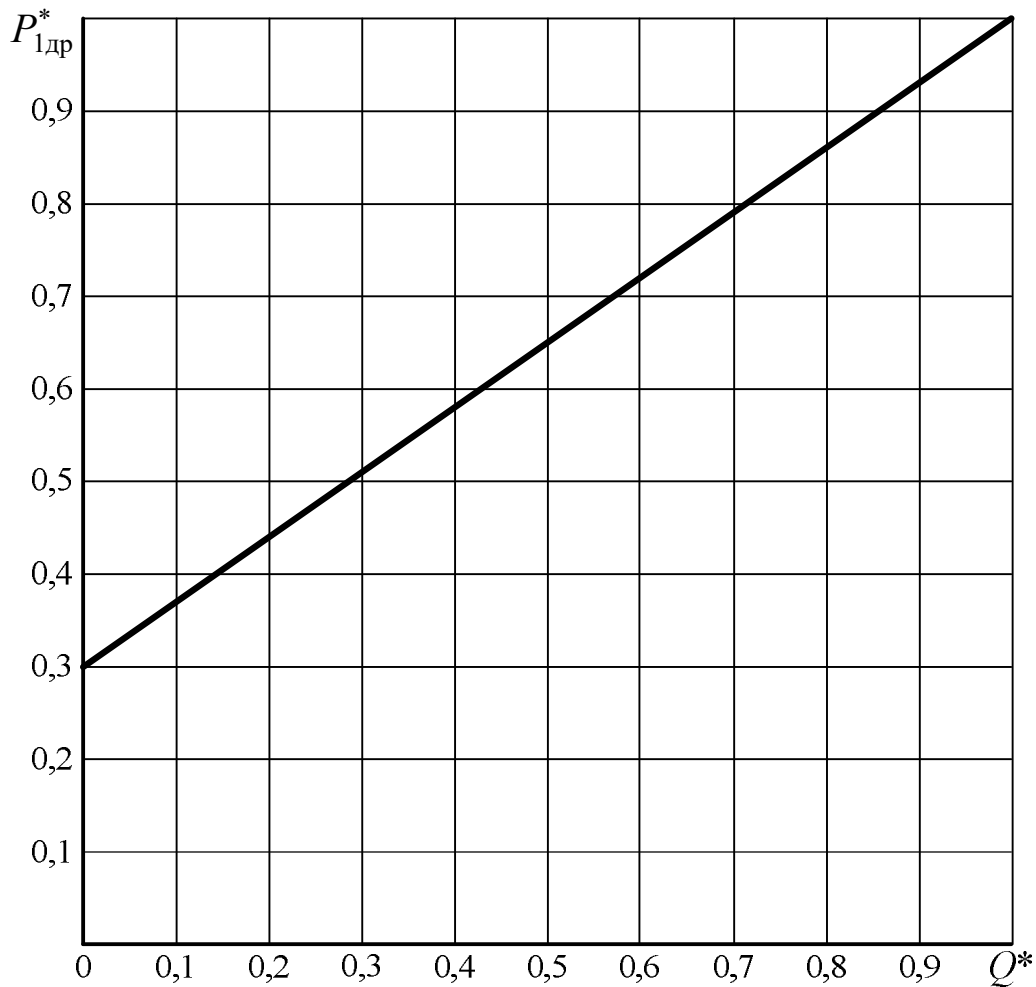


Рисунок 2 – Зміна спожитої потужності від продуктивності вентилятора при регулюванні подачі засувкою на трубопроводі

Переведення спожитої потужності у відносних одиницях в іменовані проводиється за формулою

$$P_{1др} = P_{1др}^* \cdot P_{1н};$$

де $P_{1н}$ – спожита потужність на вищій швидкості (подачі), кВт.

4 Приклад розрахунку

Для заданого тришвидкісного електродвигуна визначити економію електроенергії при використанні його в приводі вентилятора в порівнянні з одношвидкісним електродвигуном і регулюванням подачі повітря засувкою.

4.1 З таблиці 2 практичної роботи «Енергозбереження при перехідних процесах в електроприводах змінного струму» (с. 198-200) виписуємо паспортні дані тришвидкісного електродвигуна (таблиця 1).

Таблиця 1 – Вихідні дані за варіантом індивідуального завдання

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	P_H , кВт	η_H , %	$\cos\varphi_H$, в.о.	S_H , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{р.д.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
30	4A250M8/6/4У3	8	25	86,5	0,71	0,9	0,096	0,022	1,9
		6	28	87,5	0,82	0,8	0,054	0,01	
		4	37	86,5	0,9	0,9	0,049	0,01	

4.2 Тришвидкісний електродвигун має три механічних характеристики. Робочу частину механічної характеристики електродвигуна будуємо у вигляді прямої лінії за двома точками:

– перша точка має координати: $\omega = \omega_0$, $M = 0$;

– друга точка має координати: $\omega = \omega_H$, $M = M_H$.

Визначаємо синхронну кутову швидкість за формулою

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30},$$

де n_0 – синхронна частота обертання електромагнітного поля двигуна, об/хв.

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

Синхронну частоту обертання електромагнітного поля електродвигуна визначаємо за числом полюсів електродвигуна, записаних в його типорозмірі (таблиця 1). Для двигуна типу 4A250M8/6/4У3 $p_1 = 4$, $p_2 = 3$, $p_3 = 2$. Тоді

$$n_{01} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/хв.};$$

$$n_{02} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.};$$

$$n_{03} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв.};$$

$$\omega_{01} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,67 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{03} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}.$$

Визначаємо номінальну кутову швидкість за формулою

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{н}}),$$

де $S_{\text{н}}$ – номінальне ковзання ротора електродвигуна, в.о.

$$\omega_{\text{н1}} = 78,5 \cdot (1 - 0,09) = 71,4 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{н2}} = 104,67 \cdot (1 - 0,08) = 96,3 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{н3}} = 157 \cdot (1 - 0,09) = 142,9 \text{ рад/с}.$$

Номінальний момент електродвигуна $M_{\text{н}}$, Н·м, визначаємо за рівнянням

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, Вт.

$$M_{\text{н1}} = \frac{25 \cdot 10^3}{71,4} = 350,14 \text{ Н·м};$$

$$M_{\text{н2}} = \frac{28 \cdot 10^3}{96,3} = 290,76 \text{ Н·м};$$

$$M_{\text{н3}} = \frac{37 \cdot 10^3}{142,9} = 258,92 \text{ Н·м}.$$

Розраховані величини для робочої частини механічної характеристики тришвидкісного двигуна зводимо в таблицю 2.

Таблиця 2 – Дані електродвигуна 4А250М8/6/4У3

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	P_H , кВт	η_H %	$\cos\varphi_H$, в.о.	S_H , %	Розраховано		
							ω_0 , рад/с	ω_H , рад/с	M_H , Н·м
30	4А250М8/6/4У3	8	25	86,5	0,71	0,9	78,5	71,4	350,14
		6	28	87,5	0,82	0,8	104,67	96,3	290,76
		4	37	86,5	0,9	0,9	157,0	142,9	258,92

За даними таблиці 2 будемо робочі частини механічних характеристик тришвидкісного електродвигуна 4А250М8/6/4У3 (рисунок 3).

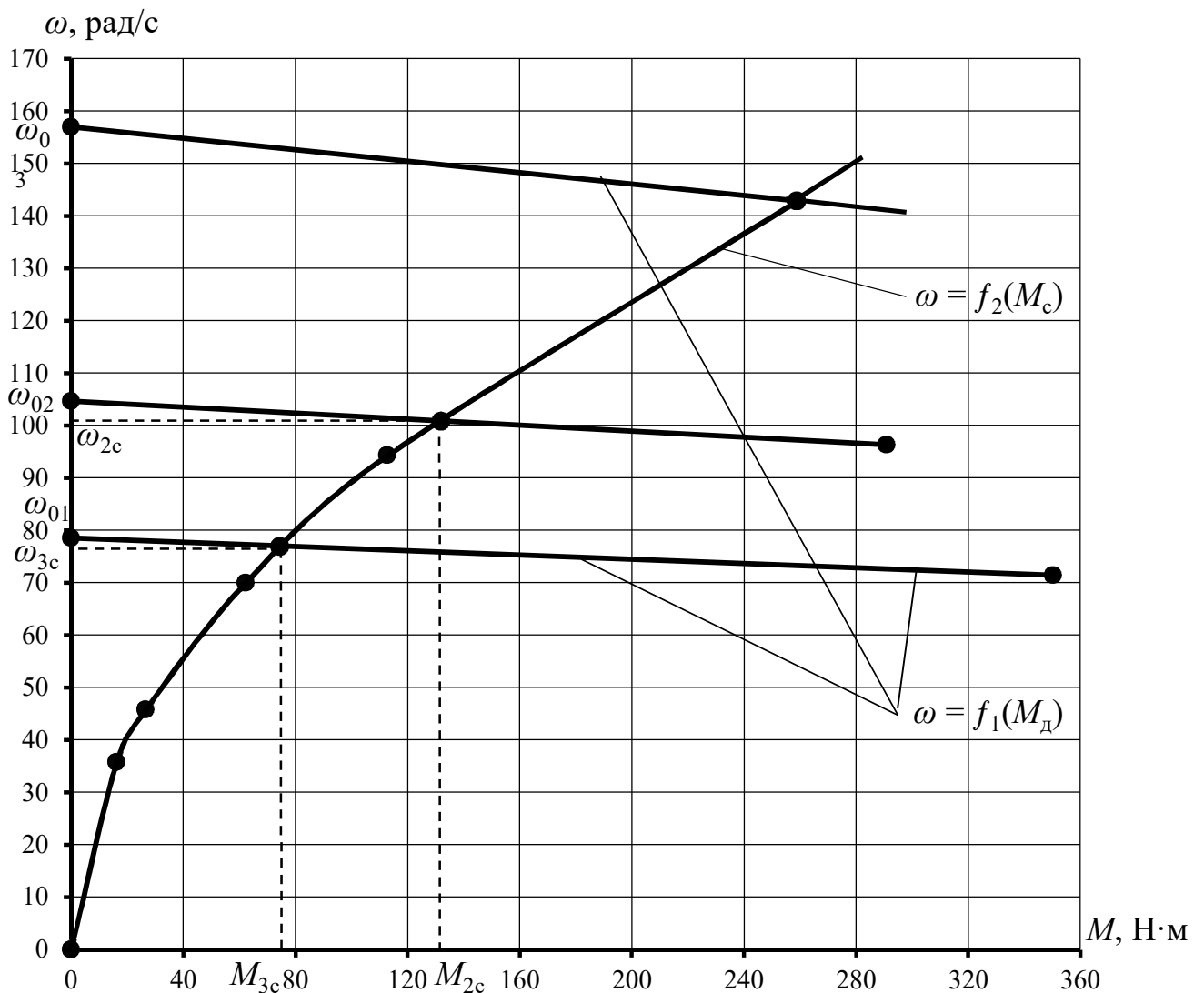


Рисунок 3 – Залежності $\omega = f_1(M_D)$, $\omega = f_2(M_C)$

4.3 Будемо механічну характеристику вентилятора. При цьому приймаємо, що при номінальній швидкості обертання ω_H механічна характеристика ве-

нтиятора проходить через точку номінального моменту, тобто $M_{\text{сн}} = M_{\text{н}}$. Момент опору на валу вентилятора при інших, менших швидкостях обертання, визначаємо за формулою

$$M_{ci} = M_{\text{сн}} \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\text{н}}} \right)^2.$$

Розраховуємо момент на валу вентилятора для п'яти точок механічної характеристики для значень $\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} = 1; 0,66; 0,49; 0,32; 0,25$.

$$\omega_1 = 142,9 \cdot 0,66 = 94,3 \text{ рад/с};$$

$$M_{c1} = 258,92 \cdot 0,66^2 = 258,92 \cdot 0,4356 = 112,79 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Результати розрахунку інших точок механічної характеристики вентилятора зводимо до таблиці 3.

Таблиця 3 – Дані розрахунку механічної характеристики вентилятора

Кутова швидкість ω , рад/с	$\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}$	$\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2$	M_c , Н·м
$\omega_{\text{н}} = 142,9$ рад/с	1	1	$M_{\text{сн}} = 258,92$ Н·м
$\omega_1 = 94,3$ рад/с	0,66	0,4356	112,79
$\omega_2 = 70,0$ рад/с	0,49	0,2401	62,17
$\omega_3 = 45,7$ рад/с	0,32	0,1024	26,51
$\omega_4 = 35,7$ рад/с	0,25	0,0625	16,18

За розрахунковими даними таблиці 3 будуємо механічну характеристику вентилятора $\omega = f_2(M_c)$ на одному графіку з трьома механічними характеристиками $\omega = f_1(M_d)$ електродвигуна (рисунок 3).

Знаходимо дві точки перетину МХ вентилятора з двома механічними характеристиками електродвигуна. Координати точок перетину (кутову швидкість ω_{2c} , ω_{3c} і моменти M_{2c} , M_{3c}) заносимо в таблицю 4.

Розраховуємо для точок перетину характеристик (таблиця 4) значення потужності P_{2i} , кВт, на валу вентилятора за формулою

$$P_{2i} = M_i \cdot \omega_i \cdot 10^{-3}.$$

Таблиця 4 – Дані до розрахунку спожитої потужності вентилятора на трьох швидкостях обертання

Кутова швидкість тришвидкісного двигуна при роботі з вентилятором, ω , рад/с	M_{2i} , Н·м	P_{2i} , кВт	$K_{\text{нав}}$, в.о.	η_i , в.о.	P_{1i} , кВт
Вища $\omega_{\text{н}} = 142,9$ рад/с	$M_{\text{сн}}$ 258,92	$P_{\text{н}}$ 37	1	0,865	42,77
Середня $\omega_{2\text{с}} = 101$ рад/с	$M_{2\text{с}}$ 132	13,3	0,36	0,835	15,93
Нижча $\omega_{3\text{с}} = 77$ рад/с	$M_{3\text{с}}$ 74	5,7	0,15	0,712	8,01

Розраховуємо коефіцієнт завантаження електродвигуна для точок перетину характеристик за формулою

$$K_3 = \frac{P_{2i}}{P_{\text{ні}}},$$

де $P_{\text{ні}}$ – номінальна потужність електродвигуна на i -й характеристиці, кВт.

Тришвидкісний ЕД має три номінальних значення потужності.

Розраховуємо ККД електродвигуна, який працює на вищій, середній та нижчій швидкостях обертання (таблиця 4) за формулою

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \cdot \frac{\frac{\alpha}{K_3} + K_3}{\alpha + 1}},$$

де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний ККД електродвигуна, який відповідає $K_3 = 1$ на кожній характеристиці. Тришвидкісний ЕД має три номінальних значення ККД;

α – коефіцієнт втрат, $\alpha = 0,5 - 0,7$. Приймаємо $\alpha = 0,6$;

K_3 – коефіцієнт завантаження електродвигуна.

Розраховуємо спожиту з мережі потужність для трьох швидкостей обертання за формулою

$$P_{1i} = \frac{P_{2i}}{\eta_i}.$$

4.4 Для визначення часу роботи електродвигуна T_i^* на кожній з трьох ра-

ніше визначених швидкостей обертання (таблиця 4) скористаємося графіками розподілення часу роботи робочої машини в інтервалі регулювання швидкості обертання у відносних одиницях (рисунок 1), прийнявши середній закон розподілення часу роботи на нижчих і вищих швидкостях обертання (крива Б, рисунок 1). Результати заносимо в таблицю 5.

Таблиця 5 – Визначення часу роботи установки на кожній ступені кутової швидкості обертання

Кутова швидкість тришвидкісного двигуна при роботі з вентилятором, ω , рад/с	Кутова швидкість ω^* , в.о.	Час T_i^* , в.о.	Час T , год.
$\omega_H = 142,9$ рад/с	$\omega_H^* = 1$	$T_H^* = 1$	$T_H = 1600$ год.
$\omega_{2c} = 101$ рад/с	$\omega_{2c}^* = 0,7$	$T_{2c}^* = 0,9$	$T_{2c} = 1440$ год.;
$\omega_{3c} = 77$ рад/с	$\omega_{3c}^* = 0,54$	$T_{3c}^* = 0,6$	$T_{3c} = 960$ год.
		$\sum T_i^* = 2,5$	$\sum T = 4000$ год.

Відносні значення кутової швидкості ω^* знаходимо за рівняннями

$$\omega_{2c}^* = \frac{\omega_{2c}}{\omega_H};$$

$$\omega_{3c}^* = \frac{\omega_{3c}}{\omega_H};$$

$$\omega_{2c}^* = \frac{101}{142,9} = 0,7 \text{ в.о.};$$

$$\omega_{3c}^* = \frac{77}{142,9} = 0,54 \text{ в.о.,}$$

яким відповідають наступні значення часу роботи у відносних одиницях (крива Б, рисунок 1)

$$T_{2c}^* = 0,9 \text{ та } T_{3c}^* = 0,6.$$

Час роботи на будь-якій швидкості визначаємо за рівнянням

$$T_i = T_{\text{пит}} \cdot T_i^*,$$

де $T_{\text{пит}}$ – питоме значення часу роботи, год./в.о.

$$T_{\text{пит}} = \frac{T_{\text{роб.}}}{\sum T^*},$$

де $T_{\text{роб.}}$ – загальний час роботи установки за рік, год. Приймаємо час роботи вентилятора $T_{\text{роб.}} = 4000$ год.;

$\sum T^*$ – сума часу роботи електродвигуна T_i^* на кожній ділянці у в.о.

$$\sum T_i^* = T_{\text{н}}^* + T_{2\text{с}}^* + T_{3\text{с}}^*;$$

$$\sum T_i^* = 1 + 0,9 + 0,6 = 2,5;$$

$$T_{\text{пит}} = \frac{4000}{2,5} = 1600 \text{ год.};$$

$$T_{\text{н}} = 1600 \cdot 1 = 1600 \text{ год.};$$

$$T_{2\text{с}} = 1600 \cdot 0,9 = 1440 \text{ год.};$$

$$T_{3\text{с}} = 1600 \cdot 0,6 = 960 \text{ год.}$$

Знаючи час роботи на кожній швидкості і спожиту потужність на кожній швидкості знаходимо витрату електроенергії за формулою

$$W_{\omega} = P_{1\text{н}} \cdot T_{\text{н}} + P_{12\text{с}} \cdot T_{2\text{с}} + P_{13\text{с}} \cdot T_{3\text{с}},$$

де $P_{1\text{н}}, P_{12\text{с}}, P_{13\text{с}}$ – спожита потужність відповідно на вищій (першій), середній (другій) і нижчій (третій) швидкостях обертання, кВт;

$T_{\text{н}}, T_{2\text{с}}, T_{3\text{с}}$ – час роботи електродвигуна відповідно на вищій (першій), середній (другій) і нижчій (третій) швидкостях обертання, год.

$$W_{\omega} = 42,77 \cdot 1600 + 15,93 \cdot 1440 + 8,01 \cdot 960 = 99060,8 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

4.5 Для визначення спожитої потужності при регулюванні подачі повітря засувкою скористаємося графіками (рисунок 2) залежності спожитої потужності у відносних одиницях при зміні подачі у відносних одиницях, якщо регулювати подачу засувкою на трубопроводі при одношвидкісному електродвигуні.

Приймаємо

$$Q_1^* = 1, Q_2^* = \omega_{2\text{с}}^*, Q_3^* = \omega_{3\text{с}}^*$$

і знаходимо спожиту потужність у відносних одиницях при регулюванні швидкості дроселюванням (засувкою на трубопроводі) $P_{1дрi}^*$ при відповідних значеннях кутової швидкості і відповідно подачі вентилятора (таблиця 6).

Таблиця 6 – Дані до розрахунку спожитої потужності вентилятора при регулюванні подачі засувкою на трубопроводі

Подача повітря при дроселюванні засувкою	Спожита потужність $P_{1дрi}^*$, в.о.	Спожита потужність $P_{1дрi}$, кВт
Вища $Q_1^* = 1$	$P_{1др1}^* = 1$	$P_{1др1} = 42,77$ кВт
Середня $Q_2^* = \omega_{2c}^* = 0,7$	$P_{1др2}^* = 0,79$	$P_{1др2} = 33,79$ кВт
Нижча $Q_3^* = \omega_{3c}^* = 0,54$	$P_{1др3}^* = 0,67$	$P_{1др3} = 28,66$ кВт

Спожиту потужність в іменованих одиницях знаходимо за формулами

$$P_{1др1} = P_{1др1}^* \cdot P_{1н};$$

$$P_{1др2} = P_{1др2}^* \cdot P_{1н};$$

$$P_{1др3} = P_{1др3}^* \cdot P_{1н},$$

де $P_{1н}$ – спожита потужність на вищій швидкості (подачі), кВт.

$$P_{1др1} = 1 \cdot 42,77 = 42,77 \text{ кВт};$$

$$P_{1др2} = 0,79 \cdot 42,77 = 33,79 \text{ кВт};$$

$$P_{1др3} = 0,67 \cdot 42,77 = 28,66 \text{ кВт}.$$

4.6 Визначаємо спожиту за рік електроенергію $W_{др}$ при регулюванні подачі вентилятора засувкою на трубопроводі за формулою

$$W_{др} = P_{1др1} \cdot T_{н} + P_{1др2} \cdot T_{2c} + P_{1др3} \cdot T_{3c},$$

де $P_{1др1}, P_{1др2}, P_{1др3}$ – спожита потужність відповідно на вищій (першій), середній (другій) і нижчій (третій) подачах, кВт;

$T_{\text{н}}, T_{2\text{с}}, T_{3\text{с}}$ – час роботи електродвигуна відповідно на вищій (першій), середній (другій) і нижчій (третій) подачах, год.

$$W_{\text{др}} = 42,77 \cdot 1600 + 33,79 \cdot 1440 + 28,66 \cdot 960 = 144603,2 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

4.7 Визначаємо економію електроенергії при регулюванні подачі тришвидкісним електродвигуном в порівнянні з регулюванням подачі повітря засувкою за формулою

$$\Delta W = W_{\text{др}} - W_{\omega};$$

$$\Delta W = 144603,2 - 99060,8 = 45542,4 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Економію електроенергії у відсотках визначаємо за формулою

$$\Delta W\% = \frac{\Delta W}{W_{\text{др}}} \cdot 100\%;$$

$$\Delta W\% = \frac{45542,4}{144603,2} \cdot 100 = 31,5\%.$$

5 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Таблиці з результатами розрахунків.
- 4 Механічні характеристики $\omega = f_1(M_{\text{д}})$ електродвигуна при різних швидкостях обертання та механічну характеристику вентилятора $\omega = f_2(M_{\text{с}})$.
- 5 Аналіз отриманих результатів.

6 Контрольні питання

- 1 Назвіть можливі способи регулювання швидкості асинхронних двигунів.
- 2 Охарактеризуйте показники регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною кількості пар полюсів.
- 3 Яким чином відбувається зміна числа пар полюсів обмотки статора багатшвидкісного асинхронного двигуна?
- 4 За якими схемами перемикання числа пар полюсів відбувається регулювання швидкості асинхронного двигуна?

- 5 Яку залежність називають механічною характеристикою електродвигуна?
- 6 За якими параметрами будуються робочі частини механічних характеристик тришвидкісного електродвигуна?
- 7 Яку залежність називають механічною характеристикою робочої машини?
- 8 Якою емпіричною формулою описують механічні характеристики робочих машин?
- 9 Як розрахувати момент на валу вентилятора?
- 10 За якою формулою розраховується потужність на валу вентилятора?
- 11 Від яких показників залежить коефіцієнт завантаження електродвигуна?
- 12 Яким чином розраховується спожита з мережі потужність для трьох швидкостей обертання електродвигуна?
- 13 За якою залежністю змінюється продуктивність вентилятора при зміні частоти обертання?
- 14 За якою залежністю змінюється повний тиск вентилятора при зміні частоти обертання?
- 15 За якою залежністю змінюється потужність вентилятора при зміні частоти обертання?
- 16 За якою залежністю змінюється коефіцієнт корисної дії вентилятора при зміні частоти обертання?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Електропривод : підручник / Ю. М. Лавріненко та ін. Київ : Ліра-К, 2009. 504 с.
- 2 Електропривод : ч.1 / О. С. Марченко та ін. Київ : Урожай, 1995. 208 с.
- 3 Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода : учебник для вузов. 6-е изд., доп. и перераб. Москва : Энергоатомиздат, 1981. 576 с.
- 4 Електропривод : навч. посіб. / за ред. О. Ю. Синявського. Київ : Аграр Медіа Груп, 2013. 586 с.
- 5 Гурин В. В., Бабаева Е. В. Электропривод : практикум. Минск : БГАТУ, 2011. 200 с.
- 6 Назар'ян Г. Н., Федюшко Ю. М., Сотнік О. В., Ковальов О. В. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів : довідниковий посібник. Харків : Планета-принт, 2016. 201 с.
- 7 Електропривод : посібник для виконання лабораторних та практичних занять / М. Л. Лисиченко та ін. Харків : ХНТУСГ, Факт, 2012. 270 с.
- 8 Електропривод у питаннях і відповідях / П. І. Савченко та ін. Харків : ХНТУСГ, Факт, 2012. 500 с.
- 9 Савченко П. И., Гаврилюк И. А., Земляной И. Н., Худобин Н. В. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве. Москва : Колос, 1996. 150 с.
- 10 Голован А. Т. Основы электропривода : учебник. Москва-Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1959. 344 с.
- 11 Фролов Ю. М., Шелякин В. П. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу : учебное пособие. Санкт-Петербург Москва Краснодар : Лань, 2012. 368 с.
- 12 Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній : підручник / Є. Л. Жулай та ін. Київ : Вища освіта, 2001. 288 с.
- 13 Фоменков А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий. Москва : Колос, 1984. 288 с.
- 14 Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник. Москва : Энергоиздат, 1982. 504 с.
- 15 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Розрахунок механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2017. 25 с.
- 16 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Розрахунок механічних характеристик і опорів пускових резисторів двигуна постійного струму послідовного збудження» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2017. 26 с.

17 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2018. 22 с.

18 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Визначення часу розгону системи «електродвигун-робоча машина» методом графоаналітичного інтегрування» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2018. 23 с.

19 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Розрахунок механічних характеристик і опорів пускових резисторів асинхронного електродвигуна з фазним ротором» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 22 с.

20 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Розрахунок електромеханічних та механічних характеристик асинхронного електродвигуна з фазним ротором для різних режимів роботи» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 33 с.

21 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичної роботи «Розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при регулюванні швидкості обертання частотою струму» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 34 с.

22 Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електропривода : методичні вказівки для проведення практичних робіт з дисципліни «Основи електропривода» частина 1 для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 122 с.

23 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Складання розрахункових схем механічної частини електропривода» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 23 с.

24 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Розрахунок механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при динамічному гальмуванні» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 32 с.

25 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Розрахунок енергетичних показників електропривода постійного струму» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 22 с.

26 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Розрахунок енергетичних показників асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 22 с.

27 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Розрахунок втрат потужності та енергії в електроприводах з асинхронними двигунами з фазним ротором» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 18 с.

28 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Енергозбереження при перехідних процесах в електроприводах змінного струму» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 27 с.

29 Постнікова М. В., Квітка С. О. Основи електропривода : методичні вказівки до практичної роботи «Енергозбереження при заміні нерегульованого електропривода на регульований з тришвидкісним електродвигуном» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 26 с.

**ТЕСТИ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ
З ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА, Ч. 1»**

1. Основне рівняння руху електропривода записується:

$$1) M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$2) M_{\text{д}} = M_c \pm J \frac{d\omega}{dt};$$

$$3) F_{\text{дин}} = m \frac{d\omega}{dt};$$

$$4) M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}.$$

2. Механічні характеристики робочих машин описують рівнянням:

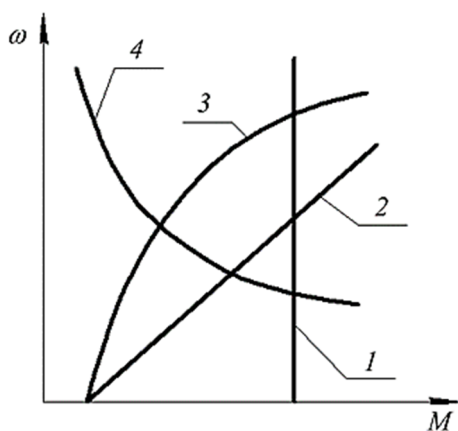
$$1) M_c = \frac{M_{c\omega\omega}}{i_p \eta};$$

$$2) M_c = F_{\omega\omega} \frac{v_{\omega\omega}}{\omega_{\text{д}}} \cdot \frac{1}{\eta};$$

$$3) M_c = M_o + (M_{\text{сн}} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x;$$

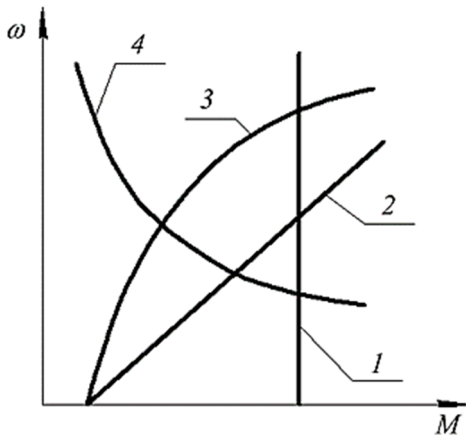
$$4) \pm M_{\text{д}} \pm M_c = \pm J \frac{d\omega}{dt}.$$

3. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №1:



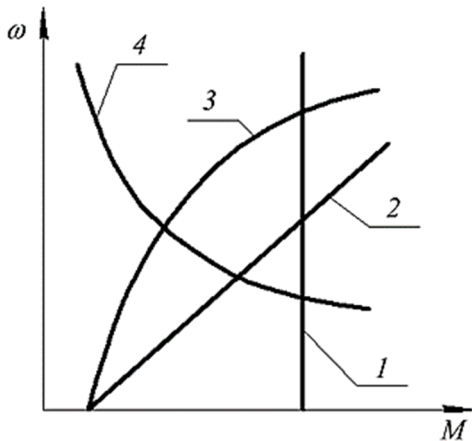
- 1) генератори постійного струму, зерночисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

4. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №2:



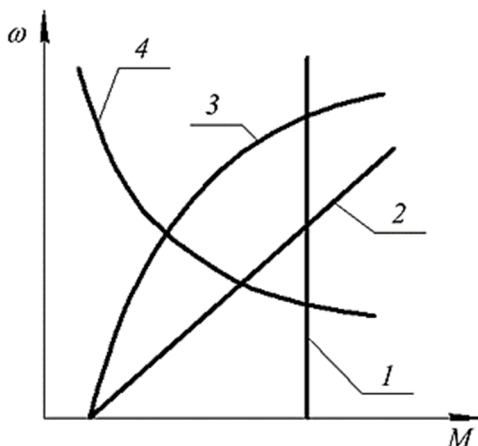
- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

5. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №3:



- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

6. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №4:



- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

7. При яких умовах привод працює в сталому режимі:

- 1) при $M_{\partial} = M_c, F_{\partial} = F_c, \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$;
- 2) при $M_{\partial} > M_c, F_{\partial} > F_c, \frac{d\omega}{dt} > 0, \frac{dv}{dt} > 0$;
- 3) при $M_{\partial} < M_c, F_{\partial} < F_c, \frac{d\omega}{dt} < 0, \frac{dv}{dt} < 0$.

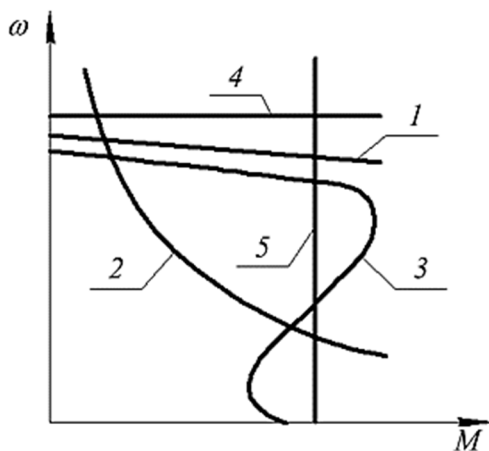
8. При яких умовах має місце уповільнення приводу:

- 1) при $M_{\partial} = M_c, F_{\partial} = F_c, \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$;
- 2) при $M_{\partial} > M_c, F_{\partial} > F_c, \frac{d\omega}{dt} > 0, \frac{dv}{dt} > 0$;
- 3) при $M_{\partial} < M_c, F_{\partial} < F_c, \frac{d\omega}{dt} < 0, \frac{dv}{dt} < 0$.

9. При яких умовах має місце прискорення приводу:

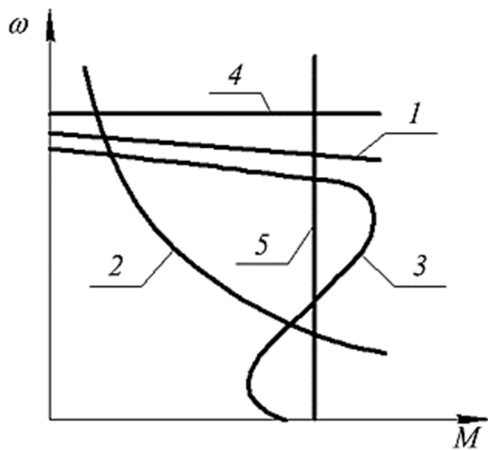
- 1) при $M_{\partial} = M_c, F_{\partial} = F_c, \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$;
- 2) при $M_{\partial} > M_c, F_{\partial} > F_c, \frac{d\omega}{dt} > 0, \frac{dv}{dt} > 0$;
- 3) при $M_{\partial} < M_c, F_{\partial} < F_c, \frac{d\omega}{dt} < 0, \frac{dv}{dt} < 0$.

10. Вкажіть природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна:



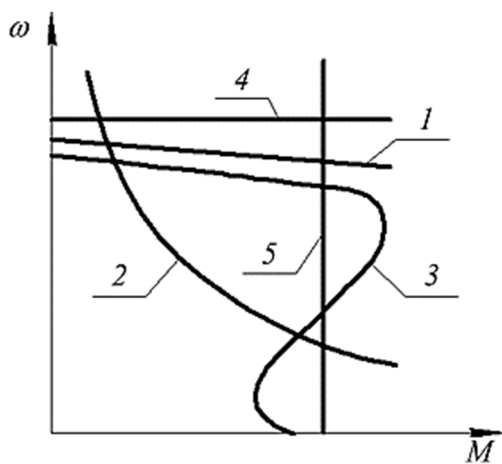
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

11. Вкажіть природну механічну характеристику електродвигуна постійного струму послідовного збудження:



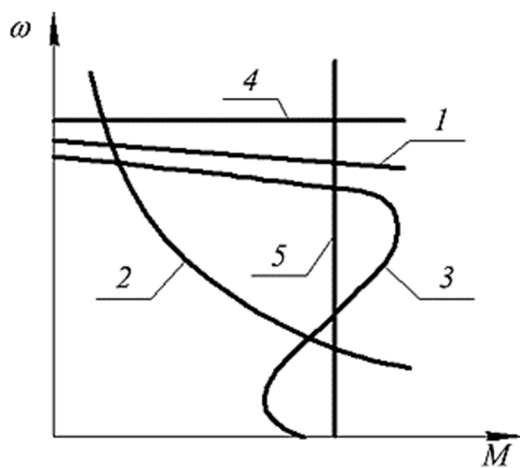
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

12. Вкажіть природну механічну характеристику електродвигуна постійного струму незалежного (паралельного) збудження:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

13. Вкажіть природну механічну характеристику синхронного електродвигуна:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

14. Електроприводом називають (виберіть варіант з найбільш точним і повним визначенням):

- 1) статичний пристрій, призначений для перетворення первинної системи напруги і струму до вторинної системи одержання обертального моменту сили для приведення в рух виконавчих органів робочих машин;
- 2) електромашинний пристрій, в якому механічна енергія передається робочій машині після попереднього перетворення електричної енергії в механічну в приводному електродвигуні;
- 3) область електромеханіки, яка вивчає закони перетворення електричної енергії в механічну та особливості приводу виконавчих органів робочих машин;
- 4) електромеханічну систему, що складається з електродвигуна, перетворювального, передавального та керуючого пристроїв і призначена для приведення в рух виконавчих органів робочих машин та керування цим рухом.

15. Що розуміють під автоматизованим керуванням електроприводом залежно від участі в цих діях людини (оператора)?

- 1) керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично;
- 2) керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора;
- 3) керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом;
- 4) сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки.

16. Що розуміють під автоматичним керуванням електроприводом залежно від участі в цих діях людини (оператора)?

- 1) керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично;
- 2) керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора;
- 3) керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом;
- 4) сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки.

17. Що розуміють під неавтоматичним (ручним) керуванням електроприводом залежно від участі в цих діях людини (оператора)?

- 1) керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично;
- 2) керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора;
- 3) керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом;
- 4) сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки.

18. Що називають розімкненою системою автоматичного керування електроприводом?

- 1) систему, при якій із зміною збудовуючої дії заданий режим роботи електропривода не змінюється;
- 2) систему, при якій із зміною збудовуючої дії змінюється раніше заданий режим роботи електропривода і не відновлюється без втручання оператора;
- 3) систему, при якій основні операції здійснюються без участі оператора;
- 4) систему, при якій оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом.

19. Що називають замкненою системою автоматичного керування електроприводом?

- 1) систему, при якій із зміною збудовуючої дії заданий режим роботи електропривода не змінюється;
- 2) систему, при якій із зміною збудовуючої дії змінюється раніше заданий режим роботи електропривода і не відновлюється без втручання оператора;
- 3) систему, при якій основні операції здійснюються без участі оператора;
- 4) систему, при якій оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом.

20. Механічна характеристика робочої машини - це залежність:

- 1) моменту статичних опорів від кутової швидкості;
- 2) моменту статичних опорів від часу;
- 3) потужності статичних опорів від часу;
- 4) потужності статичних опорів від кутової швидкості.

21. Коефіцієнт жорсткості механічної характеристики електродвигуна - це відношення:

- 1) приросту моменту до приросту швидкості;
- 2) приросту моменту до приросту напруги;
- 3) приросту струму до приросту моменту;
- 4) приросту моменту до приросту струму.

22. Механічна характеристика, яку має двигун постійного струму незалежного збудження:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

23. Механічна характеристика, яку має двигун постійного струму послідовного збудження:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

24. Механічна характеристика, яку має двигун постійного струму змішаного збудження:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

25. Механічна характеристика синхронного двигуна:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

26. Механічна характеристика, яку має трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором при ковзаннях менших за критичне:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

27. Рівняння електромеханічної характеристики ДПС має вигляд:

1) $\omega = \frac{\pi}{30} n \approx 0,105 n;$

2) $\omega = \frac{U - I_a(R_{\partial\partial} + R_{я\partial})}{k\Phi};$

3) $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M(R_{\partial\partial} + R_{я\partial})}{(k\Phi)^2};$

4) $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_n}.$

28. Рівняння механічної характеристики ДПС має вигляд:

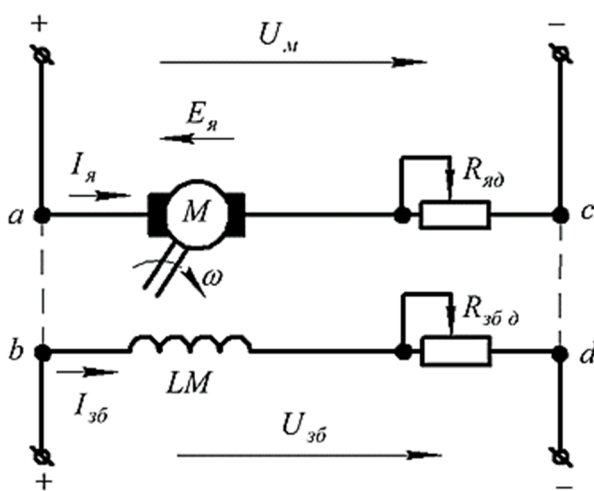
$$1) \omega = \frac{\pi}{30} n \approx 0,105 n;$$

$$2) \omega = \frac{U - I_{я}(R_{\delta в} + R_{я \delta})}{k\Phi};$$

$$3) \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M(R_{\delta в} + R_{я \delta})}{(k\Phi)^2};$$

$$4) \omega_0 = \frac{U}{k\Phi_n}.$$

29. На рисунку наведена схема вмикання ДПС:



1) послідовного збудження;

2) паралельного збудження;

3) незалежного збудження;

4) змішаного збудження.

30. При яких умовах ДПС НЗ працює в режимі генераторного (рекупера- тивного) гальмування:

1) коли напрямок дій обертального моменту ЕД протилежний напрямку обертання його якоря;

2) коли при незмінній схемі вмикання ЕД його якор під дією активного моменту статичних опорів робочої машини обертається з швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$;

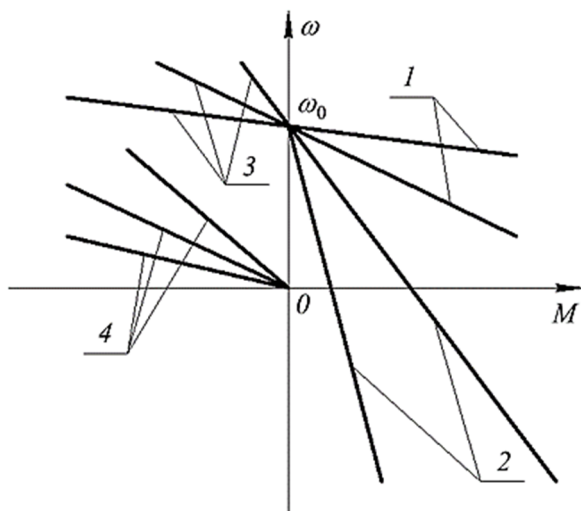
3) коли обмотка якоря вимикається з мережі і замикається на зовнішній опір або накоротко;

4) коли двигун не одержує енергії ні з мережі живлення (за винятком струму збудження), ні з вала ЕД. Якор двигуна обертає робоча машина зі швидкістю, рівною швидкості ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0$.

31. При яких умовах ДПС НЗ працює в режимі динамічного гальмування:

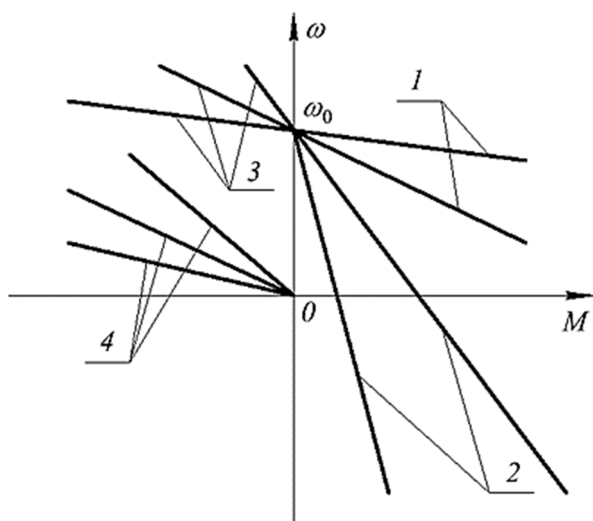
- 1) коли напрямок дій обертального моменту ЕД протилежний напрямку обертання його якоря;
- 2) коли при незмінній схемі вмикання ЕД його якоря під дією активного моменту статичних опорів робочої машини обертається з швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$;
- 3) коли обмотка якоря вимикається з мережі і замикається на зовнішній опір або накоротко;
- 4) коли двигун не одержує енергії ні з мережі живлення (за винятком струму збудження), ні з вала ЕД. Якоря двигуна обертає робоча машина зі швидкістю, рівною швидкості ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0$.

32. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму гальмування противмиканням (гальмівний спуск):



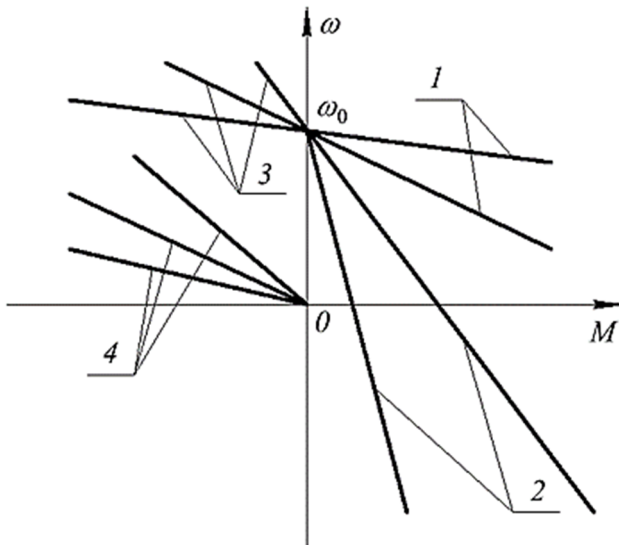
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

33. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму двигуна:



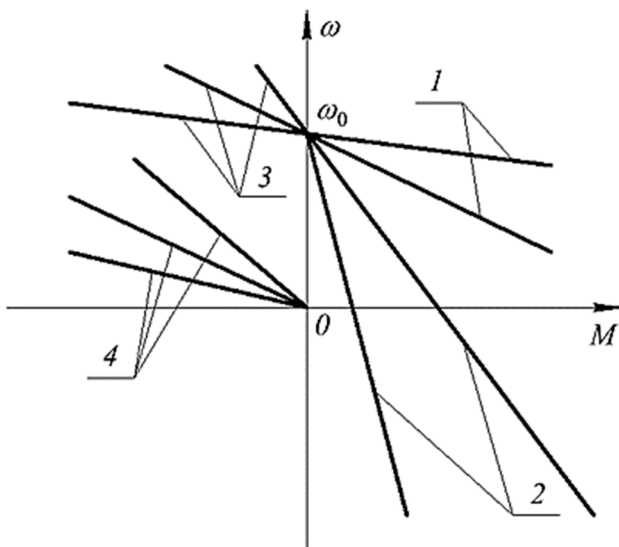
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

34. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму генераторного (рекуперативного) гальмування:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

35. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму динамічного гальмування:

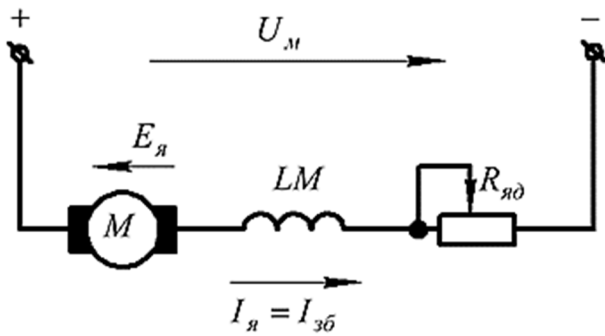


- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

36. Вкажіть два способи, застосуванням кожного з яких можна змінити напрямок обертання ДПС НЗ:

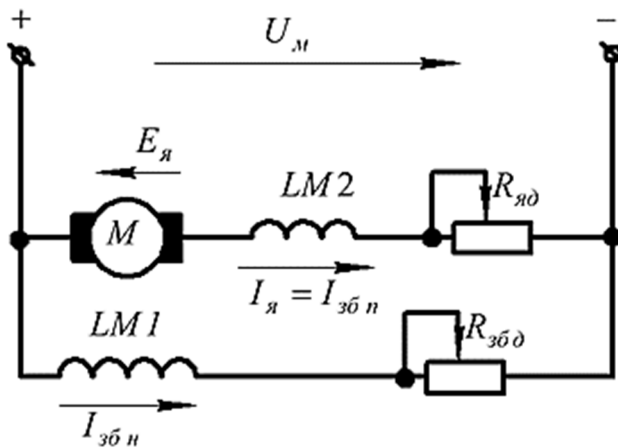
- 1) змінити полярність напруги на якорі;
- 2) змінити полярність напруги на якорі і обмотці збудження;
- 3) змінити полярність напруги на обмотці збудження;
- 4) включити реостат в коло якоря;
- 5) включити реостат в коло обмотки збудження.

37. На рисунку наведена схема вмикання ДПС:



- 1) послідовного збудження;
- 2) паралельного збудження;
- 3) незалежного збудження;
- 4) змішаного збудження.

38. На рисунку наведена схема вмикання ДПС:



- 1) послідовного збудження;
- 2) паралельного збудження;
- 3) незалежного збудження;
- 4) змішаного збудження.

39. При яких умовах асинхронний двигун працює в режимі короткого замикання:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

40. При яких умовах асинхронний двигун працює в режимі двигуна:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

41. При яких умовах асинхронний двигун працює в номінальному режимі:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

42. При яких умовах асинхронний двигун працює в режимі ідеального холостого ходу:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

43. При яких умовах асинхронний двигун працює в генераторному режимі (режим рекуперативного гальмування):

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

44. Асинхронний електродвигун з фазним ротором має наступні дані:

$M_n = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}; \omega_n = 137 \text{ рад/с}; \mu_k = 2,7; \mu_n = 2,3$. Чому буде дорівнювати максимальний момент електродвигуна?

- 1) $34,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- 2) $40,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- 3) $50,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- 4) $59,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

45. У разі зменшення напруги мережі змінного струму на 20 %, момент асинхронного електродвигуна зменшиться на:

- 1) 19 %;
- 2) 28 %;
- 3) 36 %;
- 4) 51 %.

46. Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має наступні дані: $M_n = 27 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_n = 148 \text{ рад/с}$; $\mu_n = 2,0$; $\mu_{min} = 1,6$; $\mu_{max} = 2,2$. Чому буде дорівнювати пусковий момент електродвигуна?

- 1) 43,2 Н·м;
- 2) 54 Н·м;
- 3) 59,4 Н·м;
- 4) 67,5 Н·м.

47. У разі зменшення напруги мережі змінного струму на 10 %, момент асинхронного електродвигуна зменшиться на:

- 1) 19 %;
- 2) 28 %;
- 3) 36 %;
- 4) 51 %.

48. Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має наступні дані: $M_n = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_n = 298 \text{ рад/с}$; $\mu_n = 2,1$; $\mu_{min} = 1,6$; $\mu_{max} = 2,2$. Чому буде дорівнювати мінімальний момент електродвигуна?

- 1) 8 Н·м;
- 2) 10,5 Н·м;
- 3) 11 Н·м;
- 4) 12 Н·м.

49. У разі зменшення напруги мережі змінного струму на 30 %, момент асинхронного електродвигуна зменшиться на:

- 1) 19 %;
- 2) 28 %;
- 3) 36 %;
- 4) 51 %.

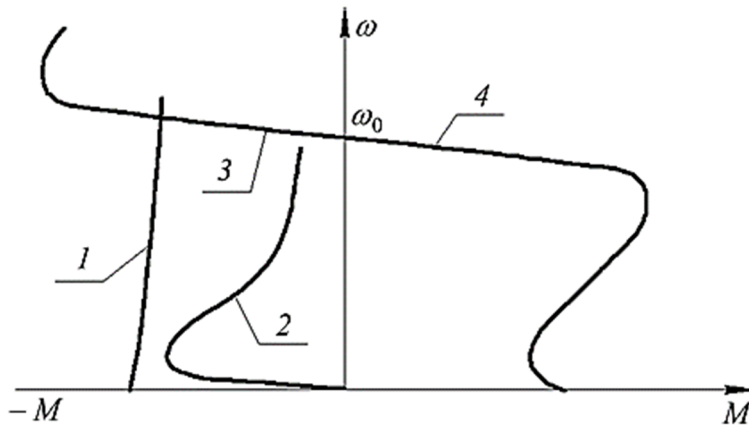
50. Асинхронний електродвигун типу АИР90L4У3 має наступні номінальні дані: $P_n = 2,2 \text{ кВт}$; $U_n = 380 \text{ В}$; $I_n = 5,0 \text{ А}$; $\omega_n = 147 \text{ рад/с}$; $\eta_n = 81 \%$, $\cos\varphi_n = 0,83$. Чому буде дорівнювати номінальний момент електродвигуна?

- 1) 9 Н·м;
- 2) 12 Н·м;
- 3) 15 Н·м;
- 4) 18 Н·м.

51. Асинхронний електродвигун типу АИР100L4У3 має наступні номінальні дані: $P_n = 4,0$ кВт; $U_n = 380$ В; $I_n = 8,5$ А; $\omega_n = 148$ рад/с; $\eta_n = 85\%$, $\cos\varphi_n = 0,84$. Чому буде дорівнювати номінальний момент електродвигуна?

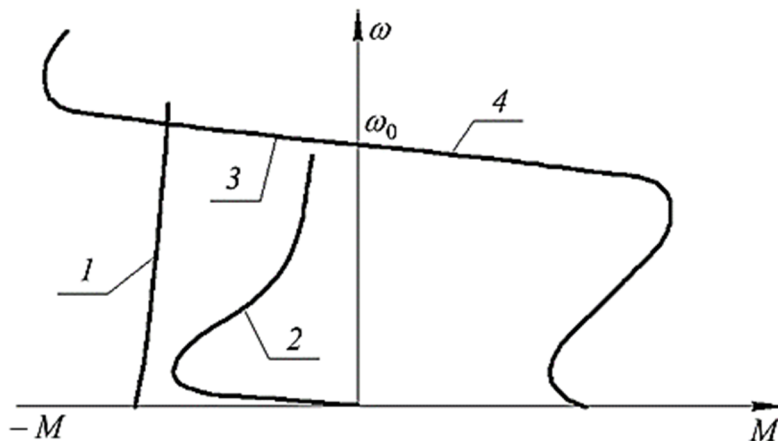
- 1) 15 Н·м;
- 2) 19 Н·м;
- 3) 23 Н·м;
- 4) 27 Н·м.

52. Вкажіть механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі генераторного (рекуперативного) гальмування.



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

53. Вкажіть механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування.

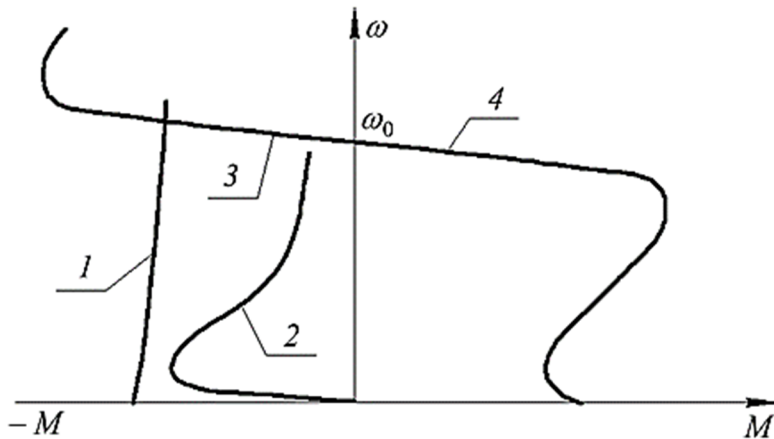


- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

54. Рекуперативне гальмування асинхронного електродвигуна здійснюється:

- 1) обертанням ротора двигуна із швидкістю, вищою за синхронну;
- 2) зміною порядку чергування фаз при працюючому двигуні;
- 3) вимкненням обмотки статора із мережі змінного струму і подачею зниженої напруги;
- 4) такий гальмівний режим здійснити неможливо.

55. Вкажіть механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі гальмування противмиканням.



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

56. Гальмування противмиканням асинхронного електродвигуна здійснюється:

- 1) обертанням ротора двигуна із швидкістю, вищою за синхронну;
- 2) зміною порядку чергування фаз при працюючому двигуні;
- 3) вимкненням обмотки статора із мережі змінного струму і подачею зниженої напруги;
- 4) такий гальмівний режим здійснити неможливо.

57. Динамічне гальмування асинхронного електродвигуна здійснюється:

- 1) обертанням ротора двигуна із швидкістю, вищою за синхронну;
- 2) зміною порядку чергування фаз при працюючому двигуні;
- 3) вимкненням обмотки статора із мережі змінного струму і подачею зниженої напруги;
- 4) такий гальмівний режим здійснити неможливо.

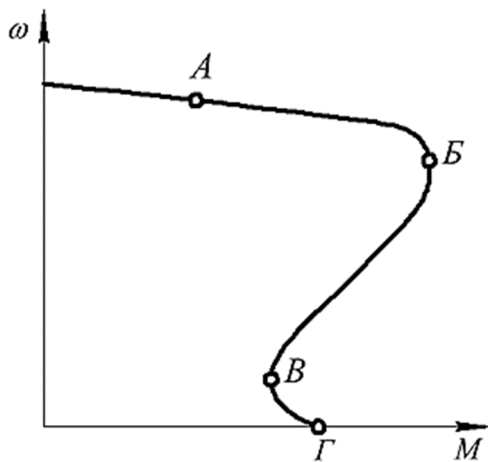
58. Лінійний пусковий струм асинхронного електродвигуна під час пуску з перемиканням обмотки статора із «зірки» на «трикутник» зменшується у:

- 1) 3 рази;
- 2) $\sqrt{3}$ раз;
- 3) 2 рази;
- 4) не зменшується.

59. У сільськогосподарському виробництві найбільше застосування знайшли двигуни:

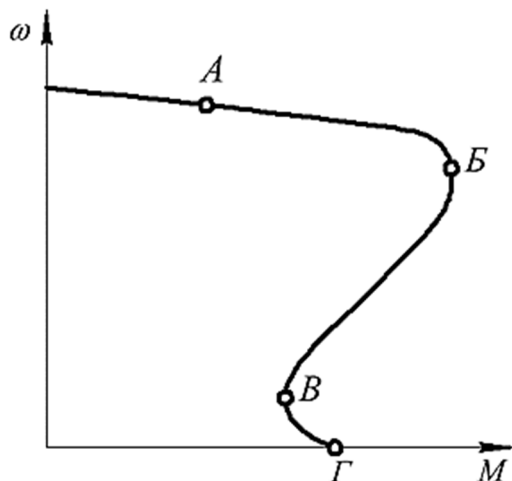
- 1) асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором;
- 2) асинхронні двигуни з фазним ротором;
- 3) синхронні електродвигуни;
- 4) електродвигуни постійного струму.

60. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна мінімальний момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

61. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна пусковий момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

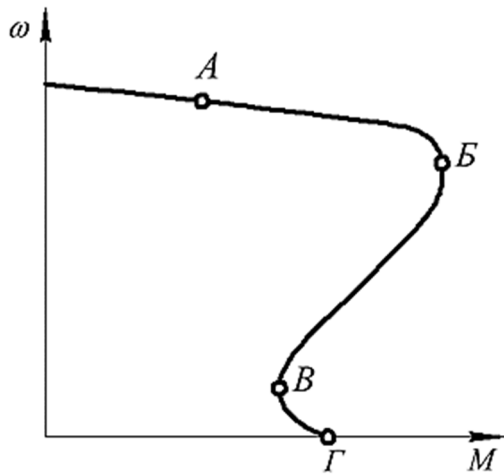
62. Пусковий момент асинхронного електродвигуна з фазним ротором у разі введення в коло ротора активного опору:

- 1) не змінюється;
- 2) зменшується до нуля;
- 3) зростає до величини критичного моменту;
- 4) зростає до величини критичного моменту, а потім зменшується.

63. Для приводу робочих машин з важкими умовами пуску застосовуються асинхронні двигуни:

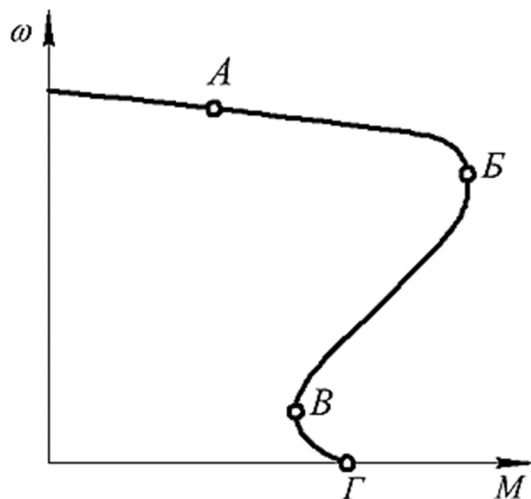
- 1) з підвищеним пусковим моментом;
- 2) з підвищеним ковзанням;
- 3) багатошвидкісні;
- 4) однофазні.

64. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна номінальний момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

65. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна максимальний момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

66. У разі зменшення прикладеної до обмотки якоря напруги у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

67. У разі введення додаткового опору в коло якоря у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

68. У разі зменшення магнітного потоку у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

69. У разі зміни прикладеної до обмотки статора напруги у асинхронного двигуна:

- 1) критичне ковзання не змінюється, а момент двигуна змінюється пропорційно квадрату напруги;
- 2) максимальний момент не змінюється, а критичне ковзання зростає;
- 3) максимальний момент зменшується, а синхронна швидкість зростає;
- 4) максимальний момент зменшується, а критичне ковзання зростає.

70. Механічна характеристика електродвигуна - це залежність:

- 1) кутової швидкості електродвигуна від струму якоря або ротора;
- 2) кутової швидкості електродвигуна від електромагнітного моменту;
- 3) кутової швидкості електродвигуна від прикладеної напруги;
- 4) моменту від струму.

71. Електромеханічна характеристика двигуна постійного струму - це залежність:

- 1) кутової швидкості електродвигуна від струму якоря або ротора;
- 2) кутової швидкості електродвигуна від електромагнітного моменту;
- 3) кутової швидкості електродвигуна від прикладеної напруги;
- 4) моменту від струму.

72. Якщо під час пуску навантаження двигуна становить 120 % від номінального, то пусковий струм асинхронного двигуна:

- 1) збільшиться на 20 %;
- 2) зменшиться на 20 %;
- 3) не зміниться;
- 4) зросте в 1,44 рази.

73. Синхронна кутова швидкість обертання асинхронного електродвигуна типу АИР250М4У3 дорівнює:

- 1) 314 рад/с;
- 2) 157 рад/с;
- 3) 104,7 рад/с;
- 4) 78,5 рад/с.

74. Синхронна частота обертання асинхронного електродвигуна типу АИР160М8У3 дорівнює:

- 1) 3000 об/хв;
- 2) 1500 об/хв;
- 3) 1000 об/хв;
- 4) 750 об/хв.

75. Регулюванням швидкості електропривода називається примусова її зміна без залежності від:

- 1) навантаження;
- 2) навантаження або підтримки її постійного значення при зміні навантаження;
- 3) навантаження і вимог технологічного процесу;
- 4) оптимального передаточного числа редуктора.

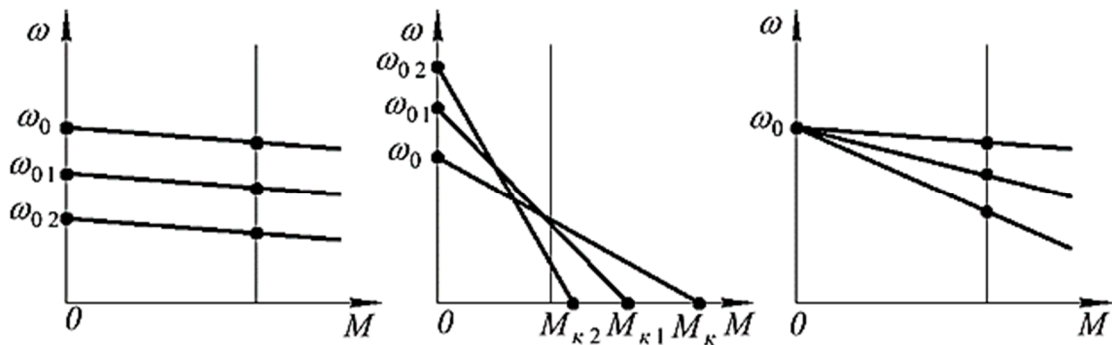
76. Назвіть джерела електричної енергії, від яких одержують живлення двигуни постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною напруги на якорі:

- 1) силові автотрансформатори;
- 2) статичний перетворювач напруги;
- 3) регулятор частоти напруги живлення;
- 4) багатосекційний пусковий реостат.

77. Діапазон регулювання кутової швидкості електропривода визначається відношенням при номінальному навантаженні:

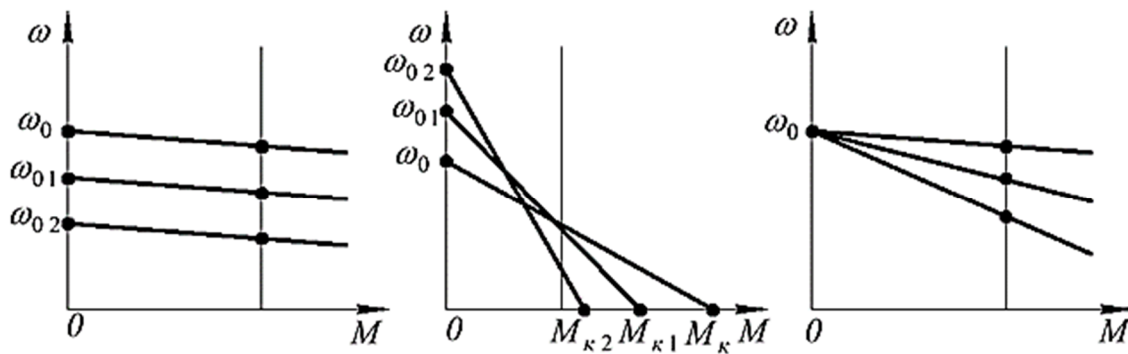
- 1) номінальної і мінімальної кутової швидкості;
- 2) максимальної і номінальної кутової швидкості;
- 3) максимальної і мінімальної кутової швидкості;
- 4) статичного перепаду швидкості при регулюванні.

78. Вкажіть механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною опору в колі якоря:



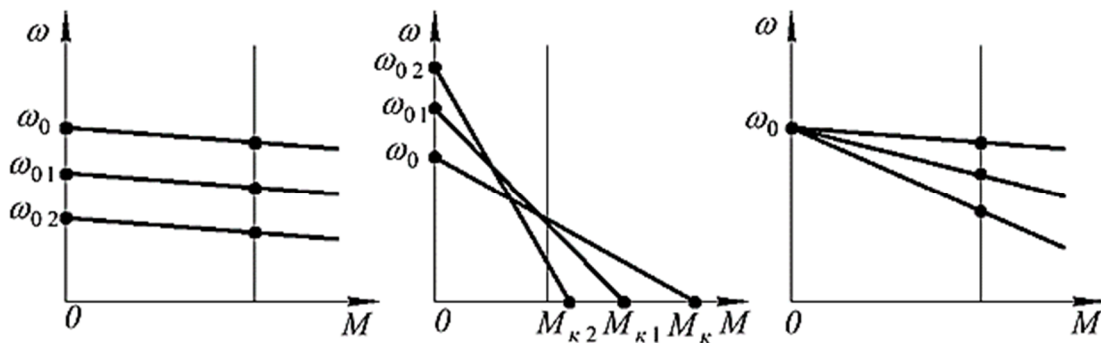
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

79. Вкажіть механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною магнітного потоку:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

80. Покажіть механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною напруги на якорі:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

81. Назвіть основні способи регулювання швидкості двигунів постійного струму:

- 1) зміною напруги на якорі двигуна;
- 2) зміною частоти напруги живлення;
- 3) зміною магнітного потоку;
- 4) зміною опору в колі якоря;
- 5) зміною числа пар полюсів обмотки якоря.

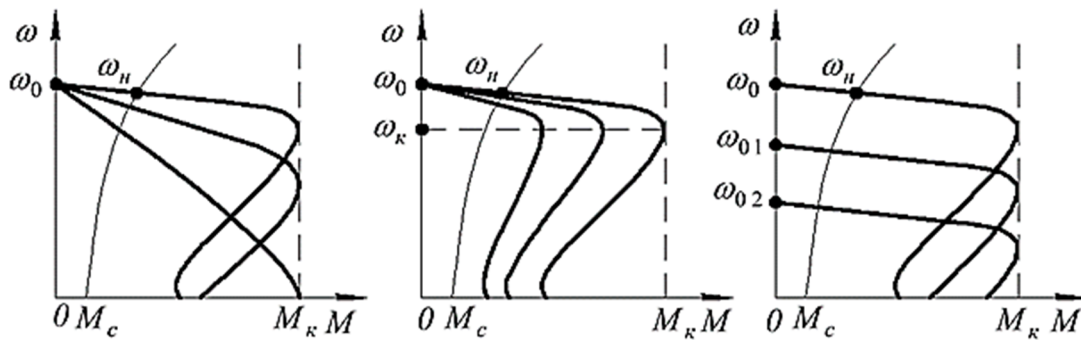
82. Синхронна частота обертання асинхронного електродвигуна типу АИР132М6У3 дорівнює:

- 1) 3000 об/хв;
- 2) 1500 об/хв;
- 3) 1000 об/хв;
- 4) 750 об/хв.

83. Синхронна кутова швидкість обертання асинхронного електродвигуна типу АИР112М2У3 дорівнює:

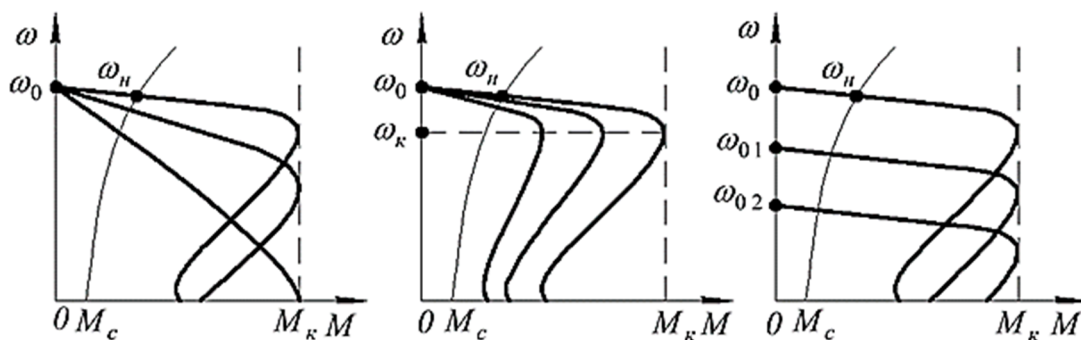
- 1) 314 рад/с;
- 2) 157 рад/с;
- 3) 104,7 рад/с;
- 4) 78,5 рад/с.

84. Вкажіть механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором при регулюванні швидкості зміною опору в колі ротору:



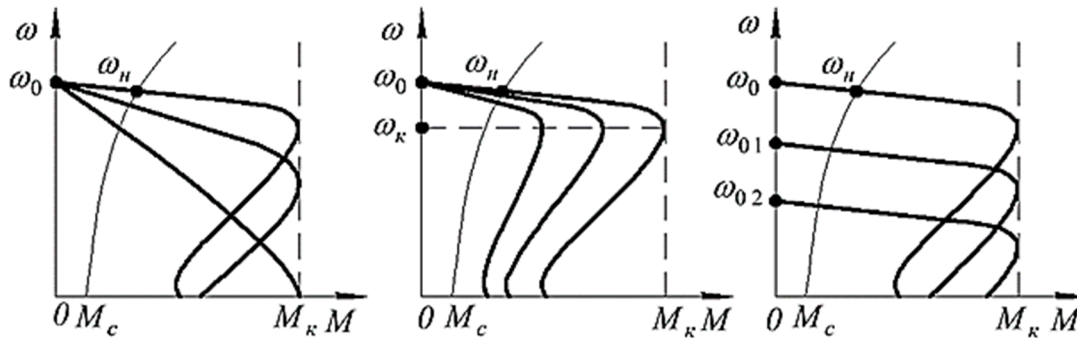
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

85. Вкажіть механічні характеристики асинхронного двигуна при регулюванні швидкості зміною напруги на статорі:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

86. Вкажіть механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

87. Стабільність роботи двигуна на заданій швидкості при регулюванні визначається:

- 1) діапазоном регулювання;
- 2) жорсткістю механічної характеристики;
- 3) напрямком регулювання;
- 4) допустимим навантаженням двигуна.

88. Основною умовою для пуску двигуна постійного струму послідовного збудження є:

- 1) вмикання пускового резистору у коло якоря;
- 2) вмикання пускового резистору у коло якоря і навантаження на валу;
- 3) навантаження на валу (20...30) % від номінального;
- 4) відсутність навантаження на валу і вмикання пускового резистору.

89. При якому способі регулювання швидкості асинхронних двигунів втрати потужності в роторі найменші:

- 1) зміною частоти напруги живлення;
- 2) зміною напруги на затискачах обмотки статора;
- 3) зміною опору роторного кола;
- 4) за допомогою каскадних установок.

90. За яким законом необхідно змінювати величину напруги на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму для механізмів з постійним моментом навантаження M_c (для робочої машини з $x = 0$):

- 1) $U_i / \sqrt{f_i} = const$;
- 2) $U_i / f_i = const$;
- 3) $U_i / f_i^2 = const$;
- 4) $U_i / \sqrt{f_i^3} = const$

91. За яким законом необхідно змінювати величину напруги на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму для механізмів з вентиляторним моментом навантаження M_c (для робочої машини з $x = 2$):

1) $U_i / \sqrt{f_i} = const$;

2) $U_i / f_i = const$;

3) $U_i / f_i^2 = const$;

4) $U_i / \sqrt{f_i^3} = const$.

92. За яким законом необхідно змінювати величину напруги на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму для механізмів, у яких M_c зменшується нелінійно при збільшенні швидкості (для робочої машини з $x = -1$):

1) $U_i / \sqrt{f_i} = const$;

2) $U_i / f_i = const$;

3) $U_i / f_i^2 = const$;

4) $U_i / \sqrt{f_i^3} = const$

93. У разі зменшення прикладеної до обмотки якоря напруги у двигуна постійного струму незалежного збудження:

1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;

2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

94. У разі введення додаткового опору в коло якоря у двигуна постійного струму незалежного збудження:

1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;

2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

95. У разі зменшення магнітного потоку у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

96. У разі зміни прикладеної до обмотки статора напруги у асинхронного двигуна:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

97. У разі введення додаткового опору в коло ротора асинхронного двигуна з фазним ротором:

- 1) критичне ковзання не змінюється, а момент двигуна змінюється пропорційно квадрату напруги;
- 2) максимальний момент не змінюється, а критичне ковзання зростає;
- 3) максимальний момент зменшується, а синхронна швидкість зростає;
- 4) максимальний момент зменшується, а критичне ковзання зростає.

98. Під час регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна приводу стрічкового транспортера ($x = 0$) зміною частоти струму необхідно при цьому змінювати напругу пропорційно:

- 1) частоті струму;
- 2) квадрату частоти струму;
- 3) частоті струму у степені $3/2$;
- 4) квадратному кореню з частоти струму.

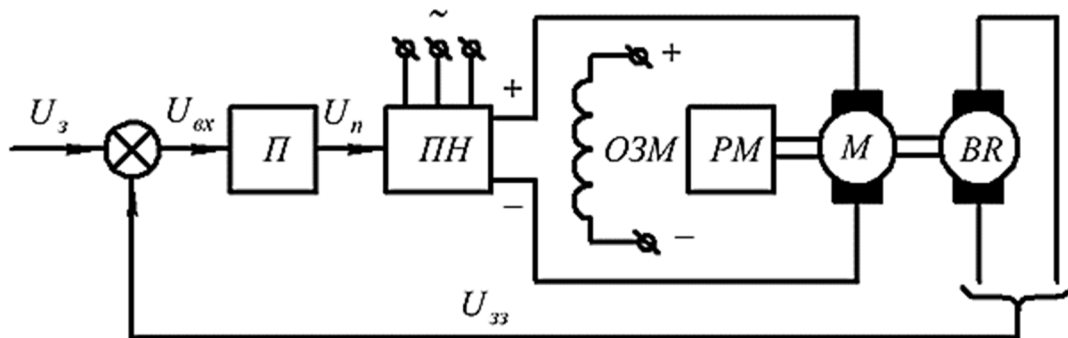
99. Під час регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна приводу вентилятора ($x = 2$) зміною частоти струму необхідно при цьому змінювати напругу пропорційно:

- 1) частоті струму;
- 2) квадрату частоти струму;
- 3) частоті струму у степені $3/2$;
- 4) квадратному кореню з частоти струму.

100. Під час регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна приводу норії ($\alpha = -1$) зміною частоти струму потрібно при цьому змінювати напругу пропорційно:

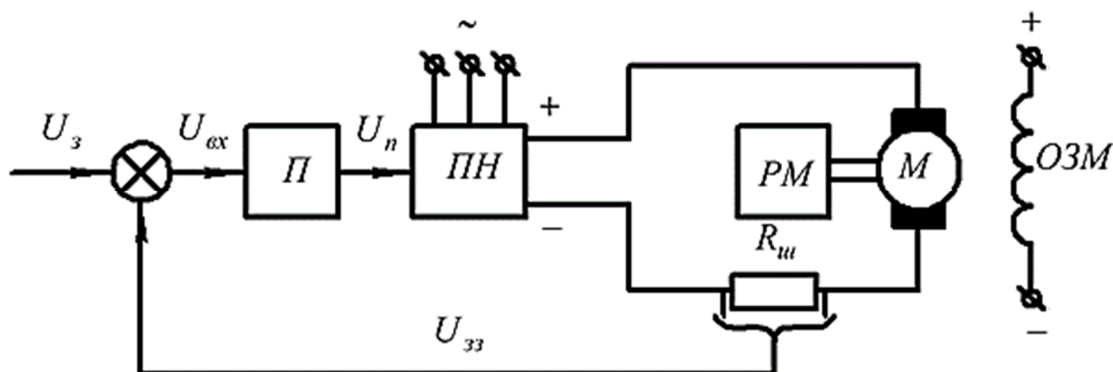
- 1) частоті струму;
- 2) квадрату частоти струму;
- 3) частоті струму у степені $3/2$;
- 4) квадратному кореню з частоти струму.

101. На рисунку зображена структурна схема автоматичного регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження з:



- 1) жорстким додатним зворотним зв'язком по струму якоря;
- 2) жорстким від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості;
- 3) жорстким зворотним зв'язком по напрузі на якорі;
- 4) нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму якоря.

102. На рисунку зображена структурна схема автоматичного регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження з:



- 1) жорстким додатним зворотним зв'язком по струму якоря;
- 2) жорстким від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості;
- 3) жорстким зворотним зв'язком по напрузі на якорі;
- 4) нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму якоря.

103. Для приводу робочих машин, що потребують плавного регулювання кутової швидкості застосовують асинхронні електродвигуни:

- 1) з підвищеним пусковим моментом;
- 2) з підвищеним ковзанням;
- 3) багатшвидкісні;
- 4) з фазним ротором.

104. Призначення реостата в колі обмотки збудження двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) регулювати напругу живлення електродвигуна;
- 2) регулювати навантаження;
- 3) регулювати швидкість якоря;
- 4) обмежувати пусковий струм.

105. Вищу від номінальної швидкість двигуна постійного струму незалежного збудження можна одержати в разі зміни:

- 1) опору кола якоря;
- 2) опору кола якоря і напруги;
- 3) напруги;
- 4) струму збудження.

106. У двигуна постійного струму незалежного збудження швидкість якоря перевищує допустиму під час:

- 1) обриву в колі якоря;
- 2) холостого ходу;
- 3) обриву у колі збудження;
- 4) навантаження, меншого за номінальне.

107. При частотному способі регулювання швидкості асинхронного електродвигуна за законом зміни прикладеної напруги $U/f_1 = const$ втрати в сталі двигуна пропорційні частоті струму в степені:

- 1) 1,3;
- 2) 3,3;
- 3) 2;
- 4) 1.

108. Втрати енергії під час гальмування противмиканням двигуна більші за втрати під час його пуску:

- 1) у 3 рази;
- 2) у 2 рази;
- 3) у 4 рази;
- 4) у 2,5 рази.

109. Назвіть основний напрямок зменшення втрат електроенергії в перехідних процесах нерегульованого електропривода:

- 1) зменшенням сумарного моменту інерції механічної частини електропривода;
- 2) поліпшенням інтенсивності розгону системи електродвигун-робоча машина;
- 3) застосуванням маховикового електропривода;
- 4) підвищенням надійності роботи спеціальних регуляторів швидкості і моменту.

110. Яка формула відповідає втратам енергії в двигунах постійного струму незалежного збудження при пуску без навантаження?

- 1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$.

111. Яка формула відповідає втратам енергії в асинхронних двигунах при пуску без навантаження?

- 1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$.

112. Яка формула відповідає втратам енергії в двигунах постійного струму незалежного збудження при гальмуванні противмиканням?

- 1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$.

113. Яка формула відповідає втратам енергії в двигунах постійного струму незалежного збудження при реверсуванні?

1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2};$

2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2};$

3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2};$

4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$

114. Максимальний коефіцієнт корисної дії системи електродвигун - робоча машина відповідає такому навантаженню, коли:

- 1) електродвигун працює з номінальною потужністю;
- 2) змінні втрати в електродвигуні більше постійних в системі;
- 3) постійні і змінні втрати однакові;
- 4) редуктор має оптимальне передавальне число.

115. За якою формулою визначаються повні втрати потужності в електродвигуні при номінальному навантаженні?

1) $\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n};$

2) $\Delta P_n = \Delta P_c + \Delta P_m;$

3) $\Delta P_x = \Delta P_c + \Delta P_m \left(\frac{I_x}{I_n} \right)^2;$

4) $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_m}.$

116. Втрати енергії в регульованому електроприводі постійного струму незалежного збудження в усталеному режимі і незмінному навантаженні в разі зниження напруги на якорі:

- 1) постійні зменшуються, а змінні не змінюються;
- 2) постійні зменшуються, а змінні зростають;
- 3) втрати залишаються незмінними;
- 4) втрати зростають.

117. Втрати енергії в регульованому електроприводі постійного струму в усталеному режимі і незмінному навантаженні в разі збільшення опору в колі якоря:

- 1) постійні зменшуються, а змінні не змінюються;
- 2) постійні зменшуються, а змінні зростають;
- 3) втрати залишаються незмінними;
- 4) втрати зростають.

118. Втрати енергії в регульованому електроприводі постійного струму в усталеному режимі і незмінному навантаженні в разі зменшення магнітного потоку:

- 1) постійні зменшуються, а змінні не змінюються;
- 2) постійні зменшуються, а змінні зростають;
- 3) втрати залишаються незмінними;
- 4) втрати зростають.

119. Коефіцієнт корисної дії двигуна в разі збільшення його завантаження:

- 1) спочатку зростає до певного значення, а потім зменшується;
- 2) зростає;
- 3) зменшується;
- 4) не змінюється.

120. Змінні втрати потужності в електродвигуні залежать від струму:

- 1) лінійно;
- 2) квадратично;
- 3) логарифмічно;
- 4) не залежать.

