

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун



ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проекту "Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном" для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Затверджено методичною
радою університету,
протокол № ___ від _____.

Харків 2021

УДК 621.3

Теорія електроприводу

Методичні вказівки до курсового проекту "Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном" для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

/ А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, – Х.: ХНАДУ, 2021. – 32 с.

Методичні вказівки до курсового проекту "Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном" з дисципліни «Теорія електроприводу» містить завдання до курсового проекту та теоретичний матеріал, необхідний для осмисленого його виконання студентами і вивченні даної дисципліни. При цьому курсовий проект складається з трьох структурних частин і виконується студентом у відповідності до заданого варіанту.

Ілюстрацій – 14, таблиць – 2, бібліографія – 10 найменувань.



ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| 1. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ | 4 |
| 2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ | 5 |
| 2.1 Електричний привід з асинхронним двигуном | 5 |
| 2.2 Схема включення, статичні характеристики і режими роботи асинхронного двигуна | 6 |
| 2.3 Механічні характеристики асинхронного двигуна | 9 |
| 2.4 Гальмування з віддачею енергії в мережу..... | 14 |
| 2.5 Гальмування протиковиканням | 15 |
| 2.6 Динамічне гальмування асинхронного двигуна | 15 |
| 3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ | 22 |
| 4. ПОБУДОВА ДИНАМІЧНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА. ГРАФІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПУСКУ ТА ГАЛЬМУВАННЯ | 27 |
| 5. ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ | 30 |
| ЛІТЕРАТУРА..... | 31 |



1. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Мета курсового проекту – поглиблене вивчення питань курсу "Теорія електроприводу" і "Електротехніка та електромеханіка" і засвоєння інженерних методик розрахунку перехідних процесів у складних електромеханічних системах та визначення часу пуску та гальмування електроприводу, розрахунок необхідних технічних параметрів силового обладнання електроприводів.

Кожен студент відповідно до виданого завдання повинен самостійно виконати і відобразити в пояснювальній записці такі питання:

– відповісти на поставлене питання по теорії електроприводу з асинхронним двигуном згідно свого варіанту;

– згідно з заданими паспортними даними двигуна розрахувати і побудувати його механічну характеристику для робочої ділянки, ділянок рекуперативного гальмування і гальмування противовмиканням. Спочатку, необхідно побудувати механічну характеристику в координатних площинах $M = f(s)$, потім в $M = f(\omega)$;

– використовуючи задану навантажувальну характеристику виконавчого органу $M_c = f(\omega)$, графічно визначити час перехідного процесу режимів розгону, гальмування противовмиканням та рекуперативного гальмування.



2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Електричний привід з асинхронним двигуном

Електропривод (ЕП) із трифазним асинхронним двигуном (АД) є найбільш масовим видом приводу в промисловості, комунальному і сільському господарстві. Таке положення визначається простотою виготовлення та експлуатації АД, їх меншими в порівнянні з двигунами постійного струму масою, габаритами і вартістю, надійністю в роботі.

В основну загальнопромислову серію 4А входять двигуни потужністю від 0,06 до 400 кВт з висотами осей обертання від 50 до 355 мм, що випускаються у всіляких модифікаціях: з підвищеним пусковим моментом і ковзанням; з фазним ротором; що вбудовуються; малошумні; з вбудованим температурним захистом; з електромагнітним гальмом; з підшипниками ковзання; хімічностійкі. АД розрізняються також за кліматичним виконанням і категорією розміщення. Для комплектації ЕП великої потужності випускаються АД серії АН-2 (потужністю до 2000 кВт), АД (потужністю до 8000 кВт), ДАЗО (потужністю до 1250 кВт) і ряд інших.

Для ЕП кранових механізмів виробляються спеціалізовані АД серії МТФ (з фазним ротором) і МТКФ (з короткозамкненим ротором), а для робочих машин і механізмів металургійного виробництва – серії МТН (з фазним ротором) і МТКН (з короткозамкнутим ротором). У складі цих серій випускаються і багатошвидкісні АД. Двигуни зазначених серій відрізняються підвищеною механічною міцністю, великими пусковими моментами при порівняно невеликих пускових струмах, гарними динамічними показниками. Кранові і металургійні АД нової серії 4МТ відрізняються поліпшеними техніко-економічними показниками роботи, розширеною шкалою потужностей, більш високим рівнем стандартизації.

Двигуни серії АИ, що випускаються потужністю від 0,75 до 160 кВт, мають технічні параметри, уніфіковані серед країн – членів Інтерелектро.

Крім того, електротехнічна промисловість випускає АД серій В та ВР, призначені для роботи у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних середовищах.

Основною галуззю застосування АД до недавнього часу був нерегульований ЕП. В останні роки у зв'язку з розробкою і серійним випуском електротехнічною промисловістю тиристорних перетворювачів частоти і напруги почали створювати регульовані асинхронні ЕП з характеристиками, що не поступаються за своїми показниками ЕП постійного струму. Застосування таких ЕП у силу визначених переваг АД являє собою прогресивну тенденцію розвитку автоматизованих ЕП не тільки в нашій країні, але і у зарубіжжі.

2.2 Схема включення, статичні характеристики і режими роботи асинхронного двигуна

Трифазний АД має обмотку статора, що підключається до трифазної мережі змінного струму з напругою U_1 і частотою f_1 і обмотку ротора, що може бути виконана за двома варіантами (рис. 1).

Перший варіант передбачає виконання звичайної трифазної обмотки з провідників з виводами на три контактних кільця. Така конструкція відповідає АД з фазним ротором (рис. 1. а) і дозволяє включати в роторне коло різні електротехнічні елементи, наприклад резистори, для регулювання швидкості, струму і моменту ЕП і створювати з тією ж метою спеціальні схеми включення АД. Інший вид обмотки одержують заливанням алюмінію в пази ротора, у результаті чого утвориться конструкція, відома під назвою «біляча клітка». Схема АД з такою обмоткою, яка не має виводів і отримала назву короткозамкнута, представлена на рис. 1. б.

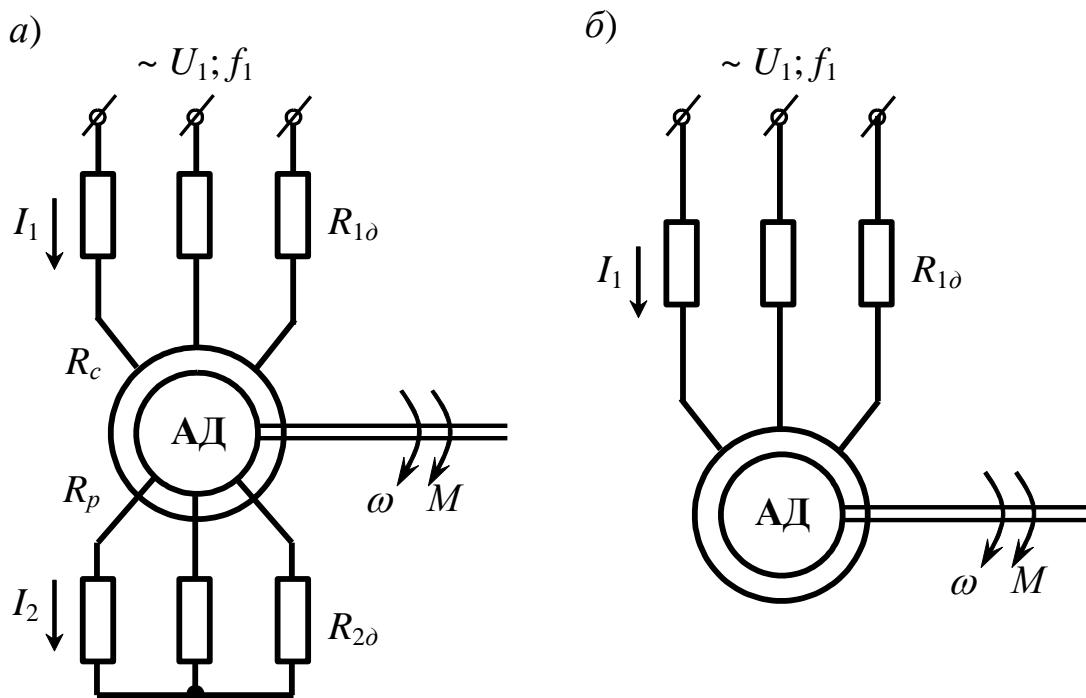


Рисунок 1 – Схема включення АД с фазним ротором (а) і з коротко замкнутим ротором (б)

Для отримання виразів для електромеханічної і механічної характеристик АД використовується його схема заміщення, на якій коло статора і ротора представлені своїми активними й індуктивними опорами. Особливість схеми заміщення АД полягає в тому, що струм, ЕРС і параметри кола ротора перераховані (приведені) до кола статора, що і дозволяє

зобразити ці два кола на схемі з'єднаними електрично, хоча в дійсності зв'язок між ними здійснюється через електромагнітне поле.

Приведення здійснюється за допомогою коефіцієнта трансформації АД за ЕРС:

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{0,95U_{\phi,ном}}{E_{2k}}, \quad (1)$$

де E_1 і E_2 – фазні ЕРС статора і ротора при нерухомому роторі;

$U_{\phi,ном}$ – фазна номінальна напруга мережі.

Розрахункові формули приведення мають такий вигляд:

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

де штрихом позначені приведені значення.

У теорії електричних машин розроблені і застосовуються дві основні схеми заміщення АД: більш точна Т-подібна і спрощена П-подібна. На рис. 2 представлено П-подібну схему заміщення, що надалі і використовується при виведенні формул для характеристик АД.

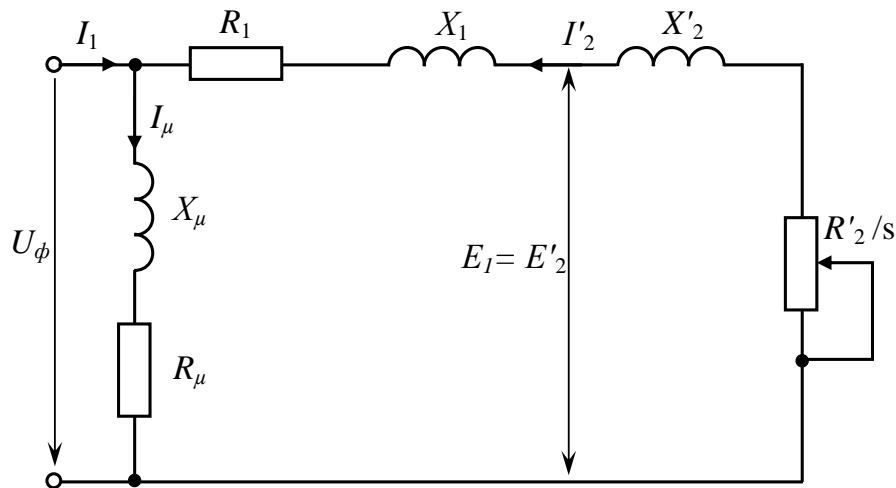


Рисунок 2 – Схема заміщення АД

На схемах (рис. 1 та рис. 2) прийняті такі позначення:

U_1, U_ϕ – діючі значення лінійної і фазної напруги мережі;

I_1, I_μ, I'_2 – фазні струми статора, намагнічування і приведений струм ротора;

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

X_μ – індуктивний опір контуру намагнічування;

R_μ – активний опір контуру намагнічування;

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

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

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

$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ – кутова швидкість магнітного поля АД (швидкість ідеального холостого ходу);

f_1 – частота живильної напруги;

p – число пар полюсів АД.

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

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

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (3)$$

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

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}. \quad (4)$$

Підставляючи значення струму I'_2 в (4), одержуємо:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] s}, \quad (5)$$

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

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

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (6)$$

Підставляючи значення $s_{кр}$ в (5), знаходимо вираз для максимального моменту:

$$M_{кр} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (7)$$

Знак “+” в рівності (6) і (7) відноситься до режиму двигуна (або гальмуванню протитовмиканням), знак “-” до генераторного режиму роботи паралельно з мережею (при $\omega > \omega_0$).

Якщо вираз (5) розділити на (7) і провести відповідні перетворення, то можна отримати:

$$M = \frac{2M_{кр} (1 + as_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2as_{кр}}, \quad (8)$$

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

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

$$a = \frac{R_1}{R_2'}.$$

Тут слід підкреслити дуже важливу для практики обставину – вплив зміни напруги мережі на механічні характеристики АД. Як видно з (6), при даному ковзанні момент двигуна пропорційний квадрату напруги, тому двигун цього типу чутливий до коливань напруги мережі.

2.3 Механічні характеристики асинхронного двигуна

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

На рис. 3 приведена механічна характеристика АД.

Її характерні точки:

1) $s = 0$; $M = 0$, при цьому швидкість двигуна дорівнює синхронній;
 2) $s = s_{ном}$; $M = M_{ном}$, що відповідає номінальній швидкості і номінальному моменту;

3) $s = s_{кр}$; $M = M_{кр,д}$ – максимальний момент в режимі двигуна;

4) $s = 1,0$; $M = M_{II} = \frac{2M_{кр} (1 + as_{кр}) s_{кр}}{1 + s_{кр}^2 (1 + 2a)}$ – початковий пусковий

момент;

5) $s = -s_{кр}$; $M = M_{кр,г}$ – максимальний момент в генераторному режимі роботи паралельно з мережею.

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

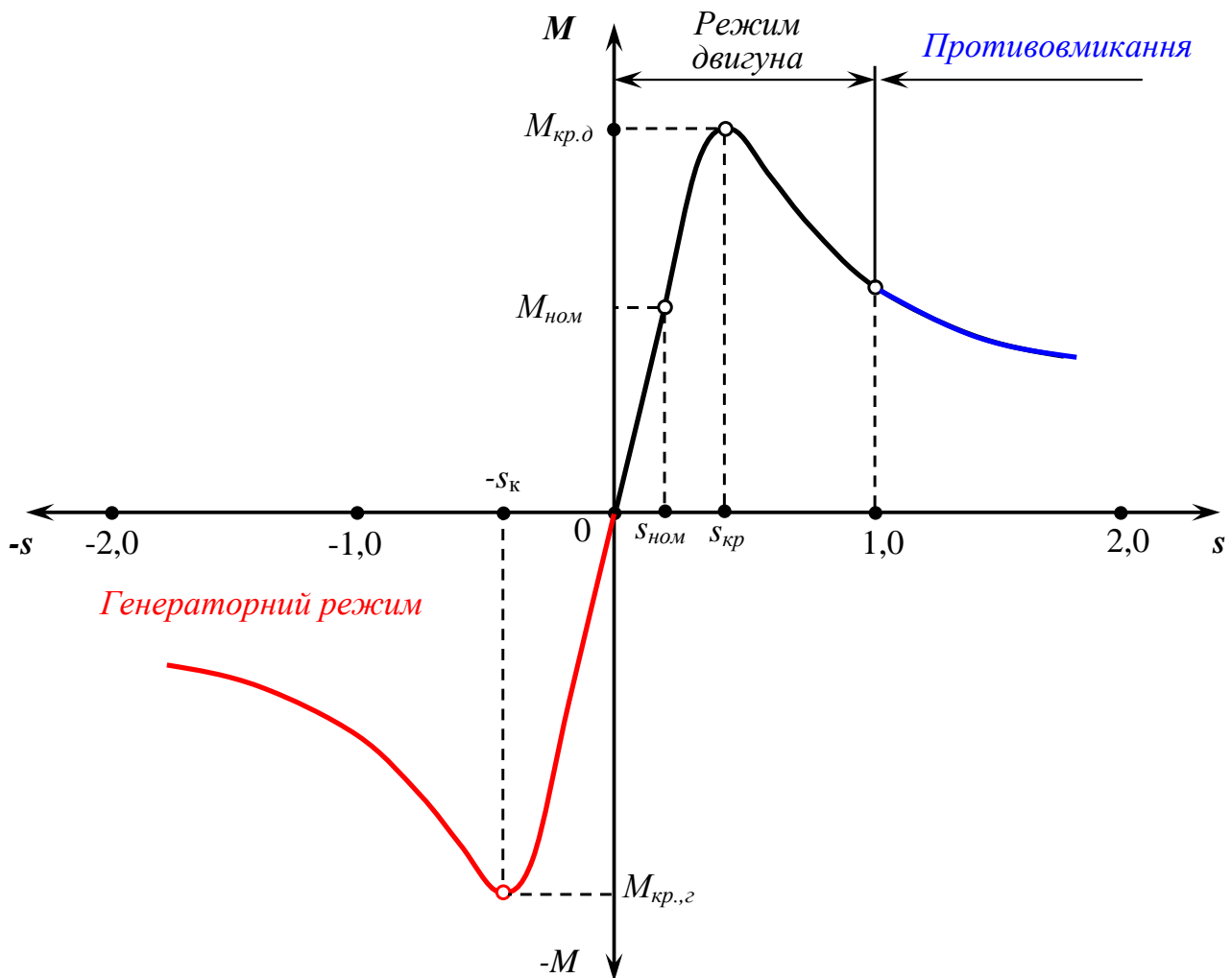


Рисунок 3 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Необхідно підкреслити, що абсолютні значення в режимі двигуна і генераторному паралельно з мережею однакові.

Проте з (7) витікає, що максимальні моменти в режимі двигуна і генераторному режимі різні. У генераторному режимі роботи паралельно з мережею максимальний момент по абсолютному значенню більше, що виходить із співвідношення:

$$M_{кр,г} = M_{кр,д} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad (9)$$

де $X_{\kappa} = X_1 + X'_2$.

Якщо в рівнянні (8) нехтувати активним опором статора, то вийде формула, зручніша для розрахунків:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (10)$$

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

Підставивши у вираз (10) замість поточних значень M і s їх номінальні значення і позначивши кратність максимального моменту $\frac{M_{кр}}{M_{ном}}$ через λ – перевантажувальна здатність, отримаємо:

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (11)$$

Аналіз формули (10) показує, що при $s > s_{кр}$ (неробоча частина характеристики) вийде рівняння гіперболи, якщо в цьому випадку нехтувати другим членом знаменника в рівнянні (10), тобто:

$$M = 2M_{кр} \frac{s_{кр}}{s}, \quad (12)$$

або

$$M = A/s, \quad (13)$$

де $A = 2M_{кр}s_{кр}$.

Ця частина характеристики практично відповідає лише пусковим і гальмівним режимам.

При малих значеннях ковзання ($s < s_{кр}$) для $M = f(s)$ вийде рівняння прямої, якщо нехтувати першим членом в знаменнику (10):

$$M = 2M_{кр} \frac{s}{s_{кр}}, \quad (14)$$

або

$$M = B \cdot s, \quad (15)$$

$$\text{де } B = \frac{2M_{кр}}{s_{кр}}.$$

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

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

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

Величина номінального ковзання залежить від опору ротора. Найменшим номінальним ковзанням при однаковій потужності і числі полюсів володіють звичайно двигуни з короткозамкнутим ротором нормального виконання. У цих двигунів через конструктивні особливості опір ротора має відносно невелике значення, що веде до зменшення значень критичного ковзання $s_{кр}$

(6) і номінального ковзання $s_{ном}$. З тих же причин при збільшенні потужності двигуна зменшується його номінальне ковзання і росте жорсткість власної механічної характеристики. Останнє ілюструється кривий рис. 4, побудованої за середніми даними для двигунів різної потужності.

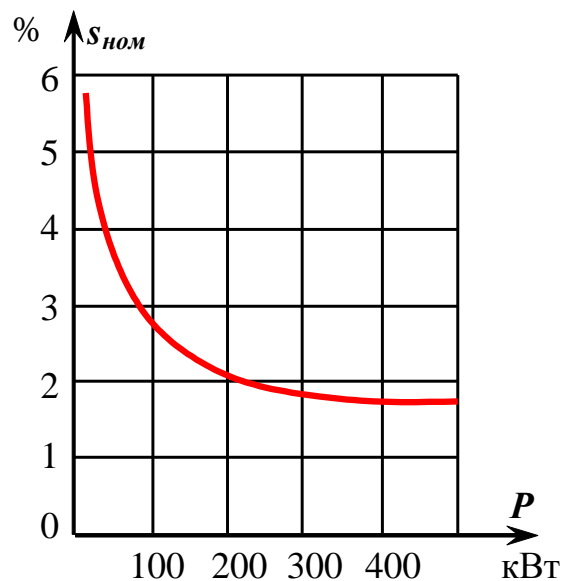


Рисунок 4 – Крива номінального ковзання для АД різної потужності

Величина критичного моменту, як це видно з (7), не залежить від активного опору ротора, критичне ж ковзання згідно (6) збільшується у міру збільшення опору ротора. Внаслідок цього у двигунів з фазним ротором при введенні резисторів в коло ротора максимум кривої моменту зміщується у бік великих ковзань.

Значення опору, необхідне для побудови природної і реостатних характеристик двигуна з фазним ротором, визначається з виразу:

$$R_2 = \frac{s_{ном} E_{2к}}{\sqrt{3} I_{2ном}}, \quad (16)$$

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

На рис. 5 приведені сімейство реостатних характеристик в режимі двигуна в координатних осях M і ω для різних значень опорів роторного кола. З відомим наближенням реостатні характеристики в робочій їх частині можуть бути прийняті лінійними. Це дає можливість при розрахунку опорів резисторів, що включаються в роторне коло АД, користуватися методами, аналогічними методам, вживаним для розрахунку опору кола якоря двигуна постійного струму незалежного збудження. Деяка неточність у визначення опору резистора вноситься при цьому за рахунок того, що характеристика АД на ділянці графіка від $M = 0$ до максимального моменту при пуску вважається лінійною.

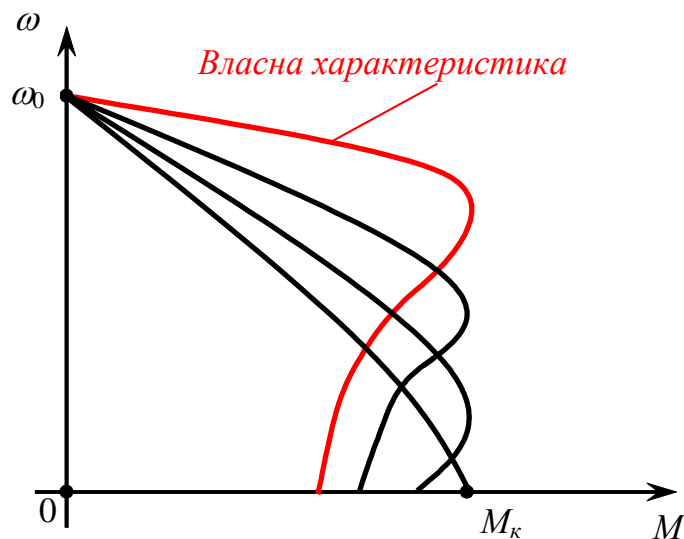


Рисунок 5 – Власна і реостатні механічні характеристики АД з фазним ротором

Точнішим є метод, коли випрямлення характеристик проводиться на меншій ділянці. Кратність максимального моменту через $\lambda = \frac{M_{кр.д}}{M_{ном}}$ повинна бути у двигунів нормального виконання з фазним ротором не нижче 1,8, а у двигунів з короткозамкнутим ротором не нижче 1,7. Двигуни, кранів, відрізняються вищою кратністю максимального моменту. Наприклад, для двигунів з короткозамкнутим ротором серії МТК $\lambda = 2,3 \div 3,4$. Двигуни з фазним ротором згаданих серій мають приблизно ті ж величини λ .

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

2.4 Гальмування з віддачею енергії в мережу

Раніше були розглянуті механічні характеристики асинхронної машини, що працює режимі двигуна. Проте АД може працювати і в гальмівних режимах: при гальмуванні з віддачею енергії в мережу, при гальмуванні протитовмиканням і при динамічному гальмуванні.

Гальмування з віддачею енергії в мережу (генераторний режим роботи паралельно з мережею) можливо при швидкості вище за синхронну. Механічні характеристики АД в координатах M і ω представлені на рис 6.

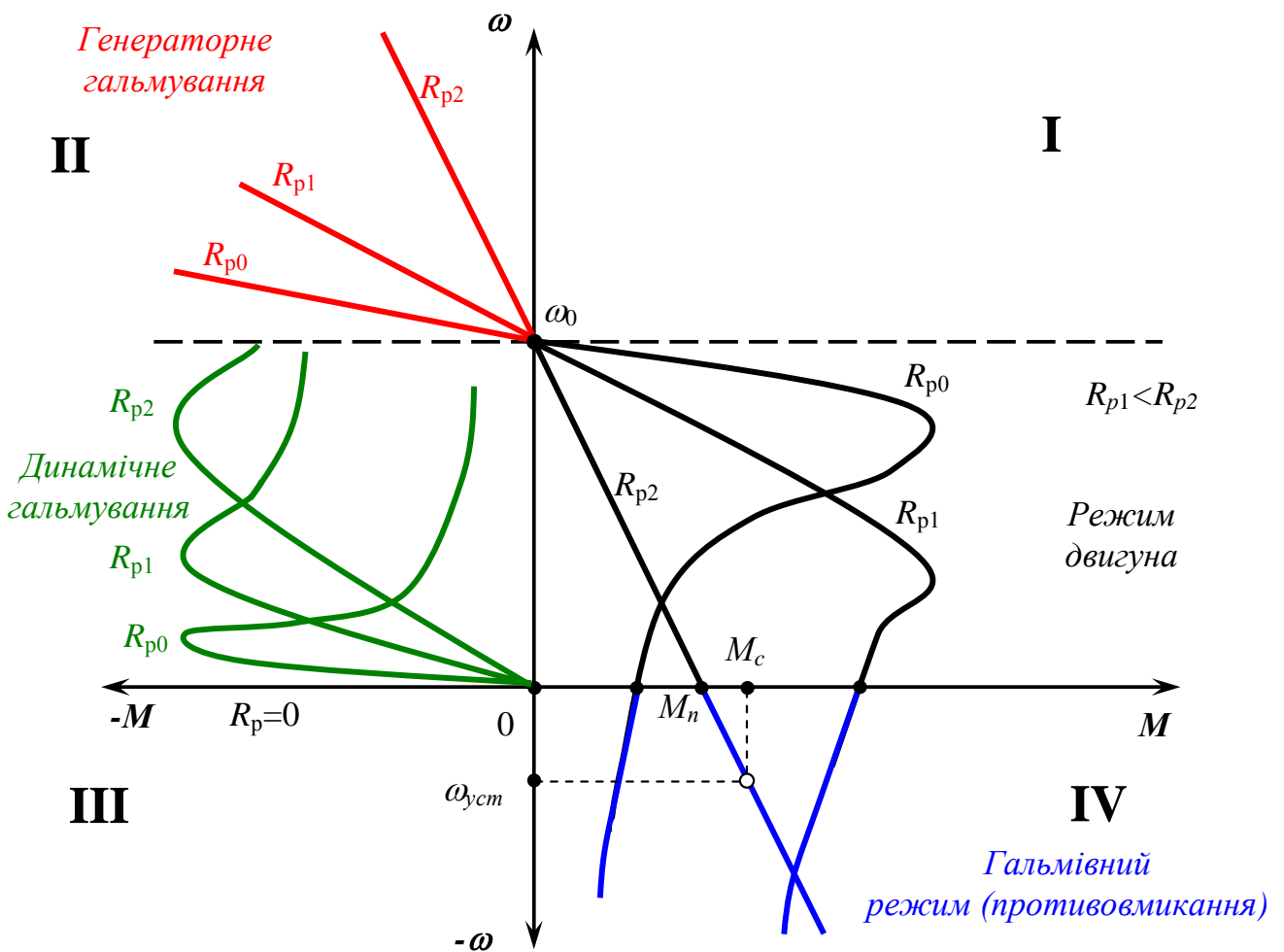


Рисунок 6 – Механічні характеристики асинхронного двигуна для різних його режимів роботи

У квадранті I розташовані ділянки характеристик режиму двигуна для трьох різних опорів роторного кола. У міру наближення швидкості двигуна до швидкості ідеального холостого ходу, або синхронної швидкості момент двигуна наближається до нуля.

При подальшому збільшенні кутової швидкості під впливом зовнішнього моменту, коли $\omega > \omega_0$, двигун працює в режимі генератора паралельно з мережею, якої він може віддавати електричну енергію, споживаючи при цьому реактивну потужність для збудження. Гальмуванню з віддачею енергії в мережу відповідають ділянки характеристик, розташовані у верхній частині квадранта **II**. У цьому режимі, як видно з виразу для $M_{кр}$ (9), максимальний момент має більше значення, ніж в режимі двигуна. Режим гальмування з віддачею енергії в мережу застосовується до двигунів при перемиканні полюсів, а також для приводів вантажопідійомних машин (підйомники, екскаватори і т. п.) і в деяких інших випадках.

2.5 Гальмування противовмиканням

Гальмування противовмиканням має значно більше застосування на практиці. Режим гальмування противовмиканням може бути одержаний, так само як і для двигуна постійного струму, при моменті навантаження $M_c > M_n$ (рис. 6).

Для обмеження струму і отримання відповідного моменту необхідно при використанні двигуна з фазним ротором в його роторне коло включити додатковий резистор. Сталому режиму при гальмуванні противовмиканням відповідає, наприклад, точка $\omega_{уст}, M_c$ на характеристиці R_{p2} (рис. 6).

Механічна характеристика для R_{p1} у режимі гальмування противовмиканням і $M_c = const$ не забезпечує стійкої роботи. Гальмування противовмиканням може бути отримано також шляхом перемикання на ходу двох фаз обмотки статора, що веде до зміни напрямку обертання магнітного поля (перехід з точки **A** в точку **B** на рис. 7). Ротор при цьому обертається проти напрямку руху поля і поступово сповільнюється. Коли кутова швидкість спаде до нуля (точка **C** на рис. 7), двигун потрібно відключити від мережі, інакше він може знов перейти в режим двигуна, причому ротор його обертатиметься в напрямі, зворотному попередньому (точка **D**).

2.6 Динамічне гальмування асинхронного двигуна

Динамічне гальмування асинхронного двигуна здійснюється звичайно включенням обмотки статора на мережу постійного струму; обмотка ротора при цьому замикається на зовнішні резистори. Для переходу з режиму двигуна в режим динамічного гальмування перемикач **K** (рис. 8) відключає статор від мережі змінного струму і приєднує обмотку статора до мережі постійного струму. Для обмеження струму і отримання різних гальмівних характеристик в колі ротора передбачені зовнішні резистори.

Проходячи по обмотці статора, постійний струм утворює нерухоме поле, основна хвиля якого дає синусоїдальний розподіл індукції. У роторі, що

обертається, виникає змінний струм, що створює своє поле, яке також нерухомо щодо статора. В результаті взаємодії сумарною магнітного потоку із струмом ротора виникає гальмівний момент, який залежить від намагнічуючої сили (НС) статора, опору ротора і кутової швидкості двигуна.

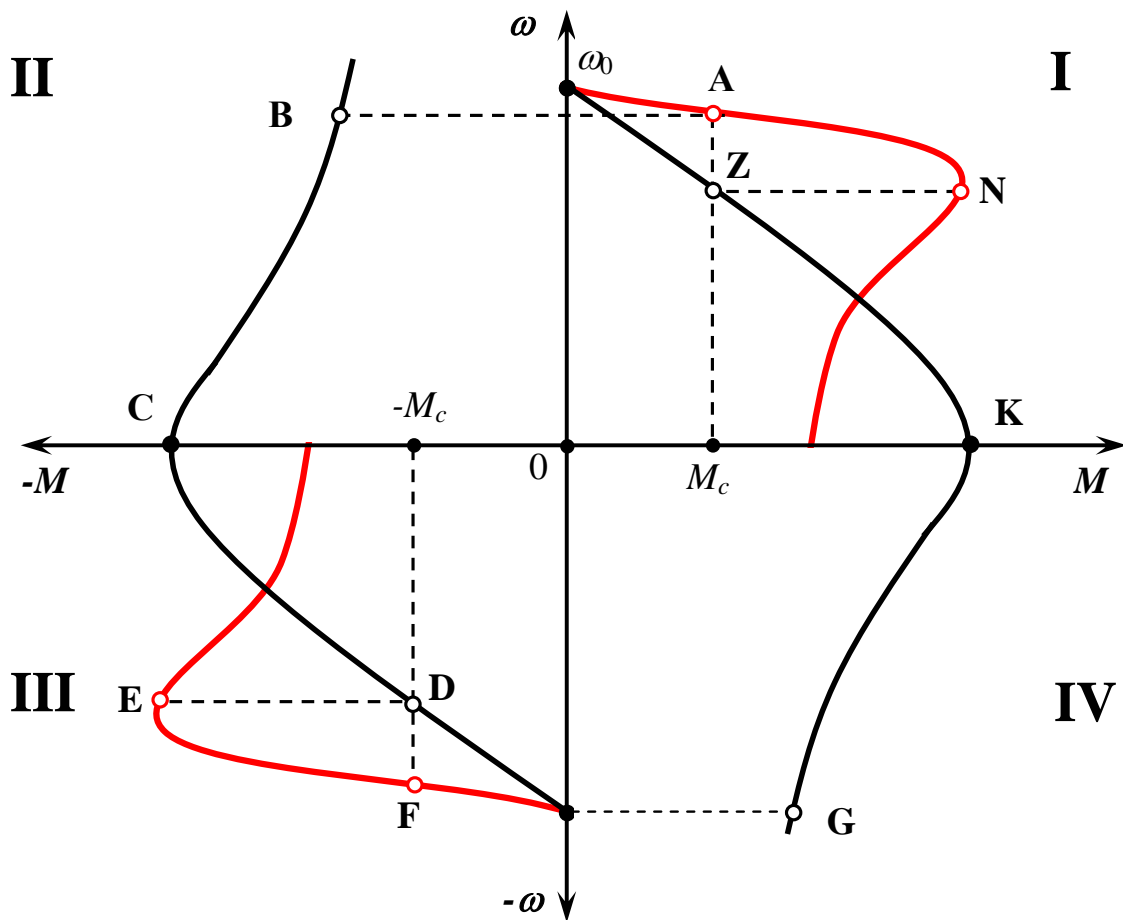


Рисунок 7 – Механічна характеристика АД для режиму гальмування противовмиканням шляхом перемикання на ходу двох фаз обмотки статора

Механічні характеристики для цього режиму приведені в нижній частині квадранта **II** (див. рис. 6). Вони проходять через початок координат, оскільки при кутовій швидкості, рівній нулю, гальмівний момент в цьому режимі також рівний нулю. Максимальний момент пропорційний квадрату прикладеної до статора напруги (якщо нехтувати насиченням) і зростає із зростанням напруги. Критичне ковзання залежить від опору роторного кола. Воно збільшується пропорційно зростанню опору. Максимальний момент при цьому не змінюється. На рис. 6 характеристики динамічного гальмування приведені для трьох різних опорів кола ротора і одному і тому ж струму статора.

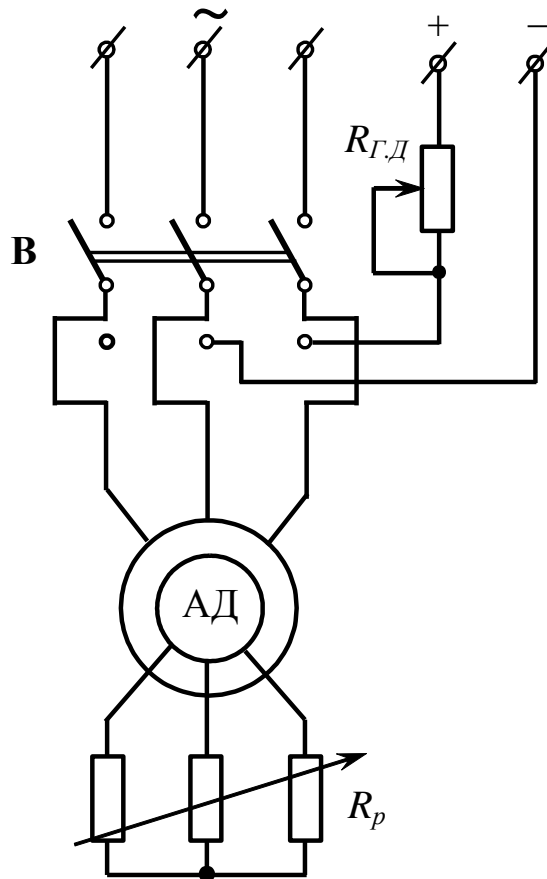


Рисунок 8 – Принципова схема динамічного гальмування

На рис. 9, представлені різні схеми включення обмоток статора при живленні їх від джерел постійного струму. У схемах на рис. 9, в, д, е навантаження всіх фаз обмотки статора рівномірне, проте схема перемикання статора складна. Простішими, часто вживаними на практиці є схеми на рис. 9, а, з.

Живлення обмоток статора АД при здійсненні динамічного гальмування може проводитися від мережі змінного струму через напівпровідниковий випрямляч В, як це показано на рис. 10.

Аналіз роботи АД в режимі динамічного гальмування доцільно провести, вважаючи, що статор живиться не постійним, а еквівалентним трифазним змінним струмом $I_{екв}$. Ця заміна припускає рівність НС, створених постійним струмом і еквівалентним змінним струмом. Амплітуда НС, створюваної змінним струмом визначається:

$$F = \frac{3\sqrt{2}}{2} I_{екв} \omega_1, \quad (17)$$

де ω_1 – число послідовно з'єднаних витків фази статора.

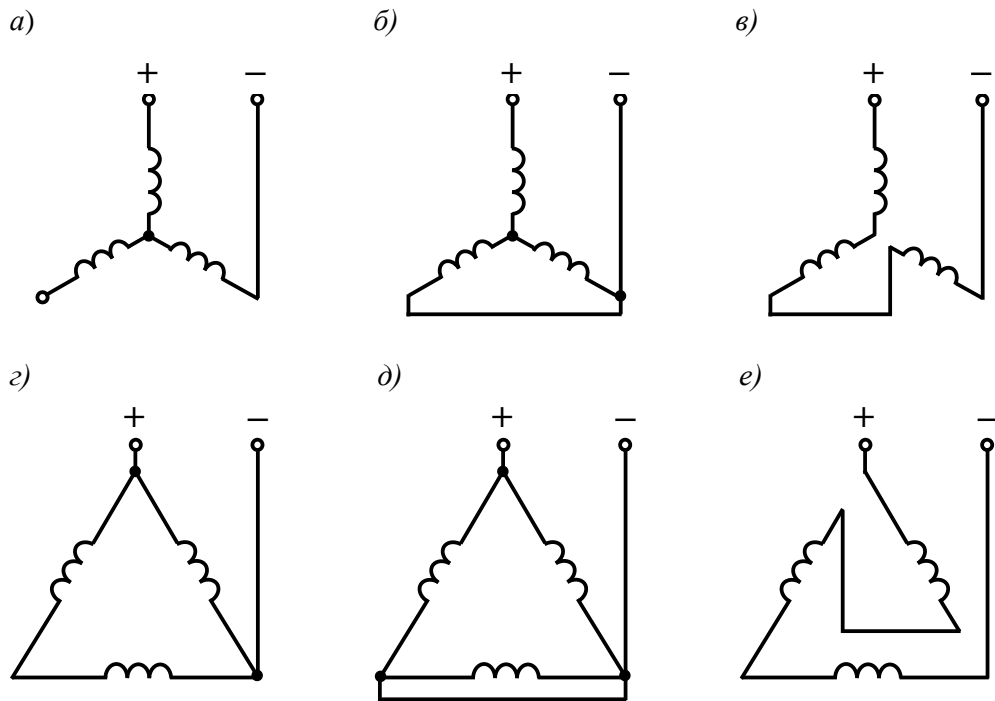


Рисунок 9 – Схеми включення обмоток статора при динамічному гальмуванні асинхронного двигуна

НС, яка створювана постійним струмом, пропорційна величині постійного 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 (рис. 9) НС постійного струму, визначається геометричною сумою НС двох фаз, рівна:

$$F = \sqrt{3} I_{II} \omega_1. \quad (18)$$

Виходячи з рівності, визначають значення еквівалентного змінного струму для даного випадку:

$$I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{II}. \quad (19)$$

Визначивши еквівалентний струм, можна побудувати спрощену векторну діаграму для АД в гальмівному режимі (рис. 11). На діаграмі I_{μ} – струм намагнічування, I_2' – вторинний струм приведений до статора, $I_{екв}$ – первинний еквівалентний струм, E_2' , E_1 – відповідно вторинна приведена і первинна ЕРС.

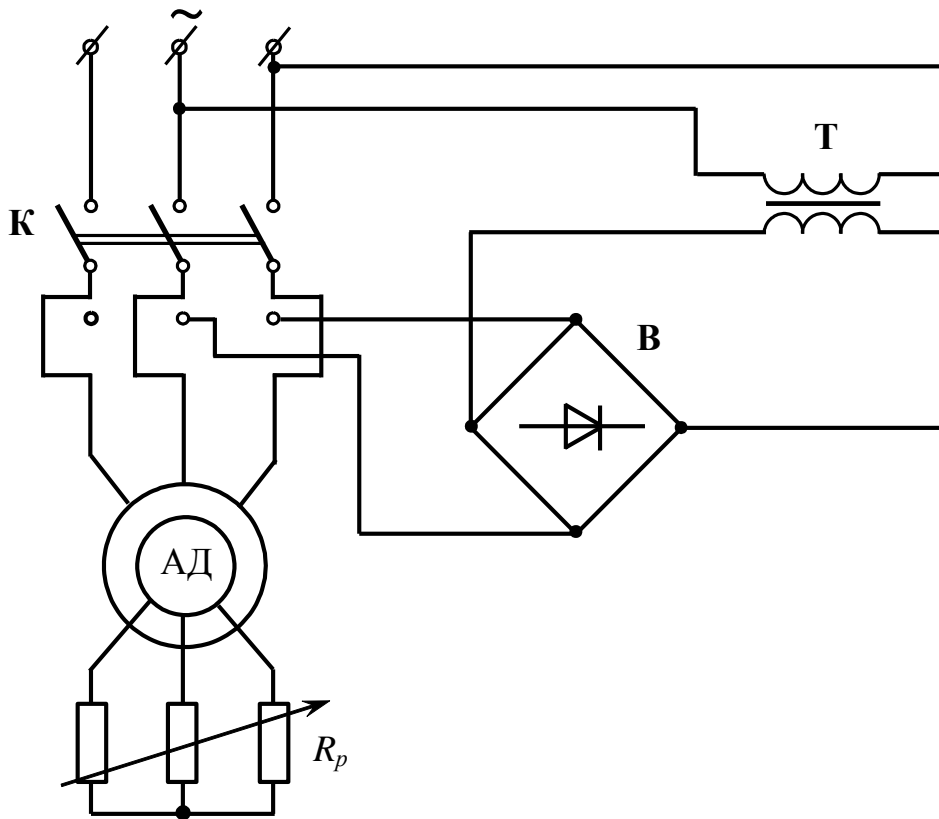


Рисунок 10 – Схема включення АД в мережу змінного струму з використанням напівпровідникового випрямляча при динамічному гальмуванні

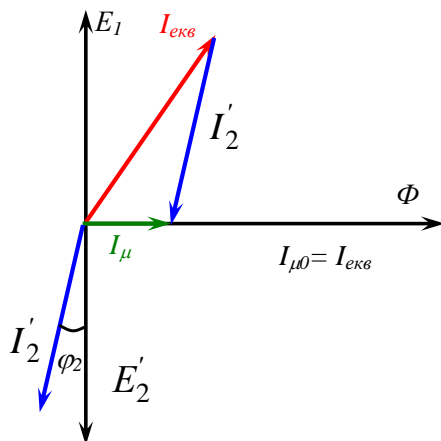


Рисунок – 11 Векторна діаграма струмів для АД в режимі динамічного гальмування

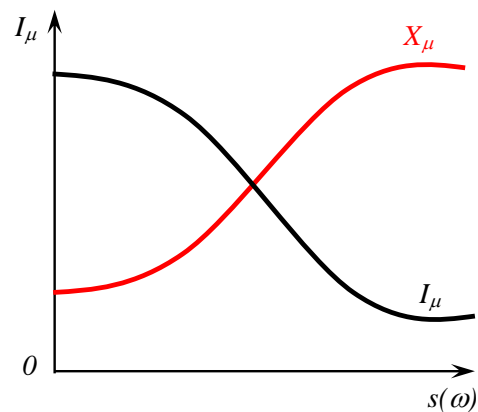


Рисунок – 12 Залежність I_μ і X_μ від ковзання (s) або швидкості ω

Струм намагнічування I_μ визначається геометричною сумою еквівалентного струму $I_{екв}$ і вторинного приведенного до статора струму I'_2 . Величина еквівалентного струму не залежить від швидкості обертання ротора, тоді як зі зміною швидкості змінюється вторинний струм. Кінець вектора $I_{екв}$

при зменшенні швидкості обертання ротора переміщатиметься по колу вправо і при нерухомому роторі вектор $I_{екв}$ співпадає зі I_{μ} , оскільки вторинна ЕРС і відповідно вторинний струм виявляться рівними нулю. Тому при малих швидкостях обертання ротора і порівняно великому еквівалентному струмі двигун в режимі динамічного гальмування виявляється з сильно насиченою магнітною системою. Навпаки, при великих швидкостях і тому ж еквівалентному струмі, магнітна система буде не насиченою. Зразкова залежність $I_{\mu} = f[s(\omega)]$ приведена на рис. 12.

У зв'язку з явищем насичення магнітної системи не залишається постійною і реактивність намагнічування X_{μ} (рис. 12).

З діаграми (рис. 11):

$$I_{екв} = I_2'^2 + 2I_{\mu}I_2' \sin \varphi_2 + I_{\mu}^2; \quad (20)$$

$$I_2' = \frac{E_{20}' \cdot s}{\sqrt{R_2'^2 + (X_2' \cdot s)^2}} = \frac{I_{\mu} X_{\mu} \cdot s}{\sqrt{R_2'^2 + (X_2' \cdot s)^2}}, \quad (21)$$

де E_{20}' – приведена вторинна ЕРС при синхронній швидкості двигуна і струмі, що намагнічує, I_{μ} (вторинна ЕРС може бути знайдена по кривій намагнічування двигуна); $X_{\mu} = \frac{E_{20}'}{I_{\mu}}$ – реактивність намагнічування;

$s = \frac{\omega}{\omega_0}$ – ковзання при динамічному гальмуванні.

Вирішуючи спільно (20) і (21) знаходимо:

$$I_2' = \frac{I_{екв} X_{\mu}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\mu} + X_2')^2}}. \quad (22)$$

Електромагнітний момент що розвивається двигуном:

$$M = \frac{3I_2' \frac{R_2'}{s}}{\omega_0} = \frac{3I_{екв}^2 X_{\mu}^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_0 \left[\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\mu} + X_2')^2 \right]}. \quad (23)$$

Якщо припустити в першому наближенні машину ненасиченої, то (23) $X_{\mu} = const$ і M буде функцією s , оскільки інші параметри приймаються постійними, тому, диференціюючи M по s знайдемо:

$$s_{max} = \frac{R_2'}{X_\mu + X_2'}, \quad (24)$$

при якій момент має максимум:

$$M_{max} = \frac{3I_{екв}^2 X_\mu^2}{2\omega_0 (X_\mu + X_2')}. \quad (25)$$

Після нескладних перетворень (23) приймає вигляд:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}}. \quad (26)$$

Рівняння (26) по своїй структурі аналогічно рівнянню механічній характеристиці АС в режимі двигуна.

Відзначимо, що критичне ковзання в режимі двигуна істотно більше за критичне ковзання в режимі динамічного гальмування при тому ж опорі кола ротора, тобто:

$$s_{кр} \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \gg \frac{R_2'}{X_\mu + X_2'}, \quad (27)$$

у наслідку того що $X_\mu \gg X_1$.

3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Робота складається з трьох частин:

1. Розкриття питання по теорії електроприводу з асинхронним двигуном згідно варіанту, табл. 1.

2. Дослідження перехідних процесів в електроприводі з асинхронним короткозамкненим двигуном. Визначення основних параметрів, що характеризують перехідні процеси в електроприводі з асинхронним двигуном.

3. Побудова механічних характеристик для різних режимів роботи електропривода з асинхронним короткозамкненим двигуном та визначення, за методом пропорцій, часу пуску та гальмування електропривода.

Таблиця 1 – Питання по теорії електроприводу з асинхронним двигуном до першого розділу пояснювальної записки курсового проекту

| № варіанту | Зміст питання |
|------------|---|
| 1. | Схеми вмикання, статичні характеристики і режими роботи АД. |
| 2. | Регулювання координат електроприводу з АД за допомогою резисторів. Розрахунок регулювальних резисторів. |
| 3. | Регулювання координат електроприводу з АД зміною напруги. |
| 4. | Регулювання швидкості електроприводу з АД зміною частоти. |
| 5. | Регулювання швидкості електроприводу з АД зміною числа пар полюсів. |
| 6. | Регулювання швидкості електроприводу з АД в каскадних схемах його вмикання |
| 7. | Регулювання швидкості електроприводу з АД імпульсним методом. |
| 8. | Способи гальмування електропривода з АД. |
| 9. | Особливості перехідних процесів в АД і їх формування. |
| 10. | Електропривод з однофазним АД. |
| 11. | Електропривод з лінійним АД. |
| 12. | Взаємозв'язаний електропривод. |
| 13. | Втрати потужності і енергії в сталому режимі електропривода. |
| 14. | Втрати потужності і енергії в перехідному режимі електропривода. |
| 15. | Коефіцієнт корисної дії електропривода. Коефіцієнт потужності електропривода. |
| 16. | Механіка електропривода |
| 17. | Механічні характеристики і режими роботи електропривода з АД. |
| 18. | Рівняння руху електропривода. |
| 19. | Стійкість роботи електропривода. |
| 20. | Двухдвигуновий електропривод. |
| 21. | Система генератор – двигун з електромашинним управлінням. |
| 22. | Електроприводи з магнітними підсилювачами. |
| 23. | Перехідні процеси в складних системах електропривода і модулювання їх. |
| 24. | Втрати потужності в електроприводі з АД. |
| 25. | Пуск електропривода з АД. |
| 26. | Регулювання швидкості електропривода з АД. |

Закінчення таблиці 1

| № варіанту | Зміст питання |
|------------|--|
| 27. | Гальмування електропривода з АД. |
| 28. | Електропривод з однофазним АД. |
| 29. | Схеми вмикання, статичні характеристики і режими роботи АД. |
| 30. | Регулювання координат електроприводу з АД за допомогою резисторів. Розрахунок регулюювальних резисторів. |

Для написання другої та третьої частини пояснювальної записки до курсового проекту необхідно вписати з табл. 2 технічні дані електродвигунів у відповідності зі своїм варіантом.

На підставі технічних даних провести розрахунки механічної характеристики та побудувати її для робочої ділянки ($0 < s < 1$), гальмування протитовмиканням ($1 < s < 2$) і генераторного гальмування ($-1 < s < 0$).

Передбачається такий порядок розрахунку механічної характеристики:

1. Визначаємо значення критичного ковзання $s_{кр}$, у відповідності до (6):

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

2. Визначаємо номінальне ковзання двигуна $s_{ном}$:

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

звідки, з огляду на $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$ (значення цього відношення задано для кожного варіанта у табл. 2), виразимо $s_{ном}$:

$$s_{ном} = \frac{s_{кр}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}.$$

3. Визначаємо значення швидкості холостого ходу n_0 (синхронної швидкості асинхронного двигуна) оскільки:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \Rightarrow s_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0},$$

$$n_0 = \frac{n_{ном}}{1 - s_{ном}}.$$

4. Визначаємо значення номінального моменту $M_{ном}$ (значення $P_{ном}$ і $n_{ном}$ у табл. 2 відповідно до варіанту):

$$M_{ном} = \frac{9550 \cdot P_{ном}}{n_{ном}}.$$

5. Визначаємо значення критичного (максимального) моменту M_{max} :

$$M_{max} = M_{ном} \cdot \lambda.$$

6. Побудова графіка механічної характеристики двигуна здійснюється на підставі використання формули Клосса (10):

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}.$$

7. Визначаємо значення кутової частоти (по заданим s):

$$\omega = \omega_0(1 - s).$$

З урахуванням визначених у пунктах 5 і 1 значень M_{max} і $s_{кр}$, використовуючи формулу Клосса, визначаємо координати точок для побудови механічної характеристики двигуна для трьох режимів: режим двигуна ($0 < s < 1$), гальмування противовмикаїшям ($1 < s < 2$) і генераторного гальмування паралельно з мережею ($-1 < s < 0$).

У формулу підставляти значення s з кроком 0,1 (з урахуванням граничних значень ділянок механічної характеристики). Наприклад, для рухового режиму $0 < s < 1$ необхідно підставляти значення $s = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$.

Розрахункову частину роботи рекомендується виконувати в середовищі пакета прикладних програм "Math CAD" або Microsoft Office Excel.

За отриманими у результаті розрахунків даними побудувати механічну характеристику двигуна:

1. В координатній площині $M = f(s)$ для трьох режимів роботи на одному графіку;

2. В координатній площині $M = f(\omega)$ для трьох режимів роботи. Кожен режим на окремому графіку.

Таблиця 2 – Технічні характеристики асинхронних двигунів

| № варіанту | $P_{ном}$ кВт | $n_{ном}$ об/хв | $\frac{M_n}{M_{ном}}$ | λ | Статор | | Ротор | | Момент інерції J , кг·м ² | Характеристика навантаження |
|---------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------|---------------|---------------|----------------|----------------|--|--|
| | | | | | R_1 , Ом | X_1 , Ом | R_2' , Ом | X_2' , Ом | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 3.5 | 890 | 2.8 | 2.8 | 2.62 | 1.7 | 2.82 | 1.425 | 0.18 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 2 | 5.3 | 875 | 3.0 | 3.0 | 1.61 | 1.14 | 2.19 | 1.12 | 0.26 | $M_c = K_1\omega^2$, де $K_1 = M_{ном}/\omega_{ном}^2$ |
| 3 | 8.2 | 875 | 2.6 | 2.7 | 0.835 | 0.88 | 1.4 | 0.88 | 0.44 | $M_c = K_2\omega$, де $K_2 = M_{ном}/\omega_{ном}$ |
| 4 | 13 | 895 | 2.8 | 2.9 | 0.51 | 0.645 | 0.8 | 0.555 | 0.85 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 5 | 9 | 670 | 2.9 | 3.0 | 0.98 | 0.843 | 1.01 | 0.645 | 1.1 | $M_c = K_1\omega^2$, де $K_1 = M_{ном}/\omega_{ном}^2$ |
| 6 | 17.5 | 915 | 3.1 | 3.2 | 0.337 | 0.431 | 0.478 | 0.356 | 1.2 | $M_c = K_2\omega$, де $K_2 = M_{ном}/\omega_{ном}$ |
| 7 | 13 | 690 | 2.8 | 3.0 | 0.534 | 0.529 | 0.64 | 0.42 | 1.55 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 8 | 27 | 916 | 2.4 | 2.6 | 0.219 | 0.271 | 0.328 | 0.346 | 1.9 | $M_c = K_1\omega^2$, де $K_1 = M_{ном}/\omega_{ном}^2$ |
| 9 | 18 | 680 | 2.3 | 2.4 | 0.352 | 0.507 | 0.507 | 0.409 | 2.15 | $M_c = K_2\omega$, де $K_2 = M_{ном}/\omega_{ном}$ |
| 10 | 36 | 920 | 3.1 | 3.3 | 0.133 | 0.197 | 0.236 | 0.25 | 2.55 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 11 | 26 | 690 | 2.6 | 2.8 | 0.202 | 0.313 | 0.326 | 0.27 | 3 | $M_c = K_1\omega^2$, де $K_1 = M_{ном}/\omega_{ном}^2$ |
| 12 | 34 | 680 | 2.3 | 2.3 | 0.164 | 0.232 | 0.307 | 0.464 | 4.3 | $M_c = K_2\omega$, де $K_2 = M_{ном}/\omega_{ном}$ |
| 13 | 46 | 680 | 2.4 | 2.5 | 0.103 | 0.172 | 0.237 | 0.366 | 5.7 | $M_c = 0,3M_n$ |
| 14 | 5.3 | 875 | 3 | 3.0 | 2.4 | 1.8 | 2.7 | 1.5 | 0.21 | $M_c = K_1\omega^2$, де $K_1 = M_{ном}/\omega_{ном}^2$ |
| 15 | 13 | 900 | 2.8 | 2.9 | 0.55 | 0.6 | 0.83 | 0.61 | 0.84 | $M_c = K_2\omega$, де $K_2 = M_{ном}/\omega_{ном}$ |
| 16 | 17.5 | 680 | 3.1 | 3.2 | 0.4 | 0.4 | 0.51 | 0.35 | 1.24 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 17 | 27 | 875 | 3 | 3 | 0.25 | 0.21 | 0.41 | 0.41 | 1.86 | $M_c = K_1\omega^2$, де $K_1 = M_{ном}/\omega_{ном}^2$ |

Закінчення таблиці 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----|----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------|---|
| 18 | 36 | 875 | 2.6 | 2.8 | 0.15 | 0.2 | 0.241 | 0.243 | 2.71 | $M_c = K_2 \omega$, де $K_2 = M_{ном} / \omega_{ном}$ |
| 19 | 34 | 900 | 2.8 | 2.8 | 0.15 | 0.2 | 0.31 | 0.364 | 4.41 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 20 | 45 | 680 | 3 | 3 | 0.11 | 0.16 | 0.241 | 0.341 | 5.51 | $M_c = K_1 \omega^2$, де $K_1 = M_{ном} / \omega_{ном}^2$ |
| 21 | 3 | 690 | 2.2 | 2,4 | 0.51 | 0.645 | 0.8 | 0.555 | 0,2 | $M_c = K_2 \omega$, де $K_2 = M_{ном} / \omega_{ном}$ |
| 22 | 6 | 680 | 2.1 | 2,2 | 0.98 | 0.843 | 1.01 | 0.645 | 0,3 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 23 | 9 | 680 | 2.5 | 2,6 | 0.337 | 0.431 | 0.478 | 0.356 | 1,2 | $M_c = K_1 \omega^2$, де $K_1 = M_{ном} / \omega_{ном}^2$ |
| 24 | 12 | 875 | 2.0 | 2,2 | 2.62 | 1.7 | 2.82 | 1.425 | 0,95 | $M_c = K_2 \omega$, де $K_2 = M_{ном} / \omega_{ном}$ |
| 25 | 14 | 900 | 2.9 | 3,1 | 1.61 | 1.14 | 2.19 | 1.12 | 1,22 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 26 | 16 | 680 | 2.2 | 2,5 | 0.835 | 0.88 | 1.4 | 0.88 | 1,56 | $M_c = K_1 \omega^2$, де $K_1 = M_{ном} / \omega_{ном}^2$ |
| 27 | 18 | 875 | 3 | 3,1 | 0.133 | 0.197 | 0.236 | 0.25 | 1,45 | $M_c = K_2 \omega$, де $K_2 = M_{ном} / \omega_{ном}$ |
| 28 | 20 | 875 | 2.4 | 2,5 | 0.202 | 0.313 | 0.326 | 0.27 | 1,68 | $M_c = 0,5M_n$ |
| 29 | 22 | 900 | 2.7 | 2,9 | 0.164 | 0.232 | 0.307 | 0.464 | 1,72 | $M_c = K_1 \omega^2$, де $K_1 = M_{ном} / \omega_{ном}^2$ |
| 30 | 24 | 680 | 2,6 | 2,7 | 0.534 | 0.529 | 0.64 | 0.42 | 1,83 | $M_c = K_2 \omega$, де $K_2 = M_{ном} / \omega_{ном}$ |

4. ПОБУДОВА ДИНАМІЧНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА. ГРАФІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПУСКУ ТА ГАЛЬМУВАННЯ

Якщо неможливо аналітично вирішити рівняння руху електроприводу, то його вирішують, наприклад, так званим методом пропорцій або методом кінцевих приростів. Суть цього методу полягає в заміні нескінченно малих приростів швидкості $d\omega$ і часу dt малими кінцевими приростами $\Delta\omega$ і Δt . При цьому передбачається, що в рівняння руху електроприводу підставляються середні значення моменту двигуна і моменту опору для кожного періоду зміни швидкості. Ці середні значення моментів звичайно знаходяться графічним шляхом на підставі механічних характеристик двигуна і виробничого механізму.

Розглянемо застосування методу пропорцій на прикладі короткозамкнутого асинхронного двигуна для приводу вентилятора.

Метод пропорцій заснований на наступному записі рівняння руху електроприводу:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (28)$$

Вважаючи, що в деякому інтервалі часу Δt різниця моментів $M - M_c$ залишається величиною постійною, одержуємо пропорцію:

$$\frac{M - M_c}{j} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (29)$$

На рис. 13 показаний хід графічної побудови кривої швидкості $\omega = f(t)$ і знаходження часу пуску двигуна, виконаний на підставі пропорції (29).

Побудова ведеться таким чином. В лівому квадранті будуються характеристики $M = f(\omega)$ і $M_c = f_1(\omega)$. Графічно знаходиться їх різниця – $M - M_c = \psi(\omega)$ крива динамічного моменту, що зображається в тому ж квадранті. Останню криву замінюють східчастою з ділянками $M - M_c = const$. Від числа ділянок залежать точність побудови і кінцеві результати. Точність тим вище, ніж на більше число ділянок розбита крива.

Отримані на окремих ділянках значення динамічних моментів відкладають вгору на осі ординат. Так, для першої ділянки отримаємо відрізок $OB_1 = OI$, для другого OB_2 і т.д. Відзначені на осі ординат точки B_1, B_2 і т.д. з'єднуються прямими з точкою A , що знаходиться від початку координат на відстані, пропорційному величині J . Потім з початку координат проводять пряму OC_1 , паралельну AB_1 . Остання пряма характеризує шукану функцію $\omega = f(t)$ для першої ділянки моментів. Це витікає з подібності трикутників AOB_1 і OD_1C_1 .

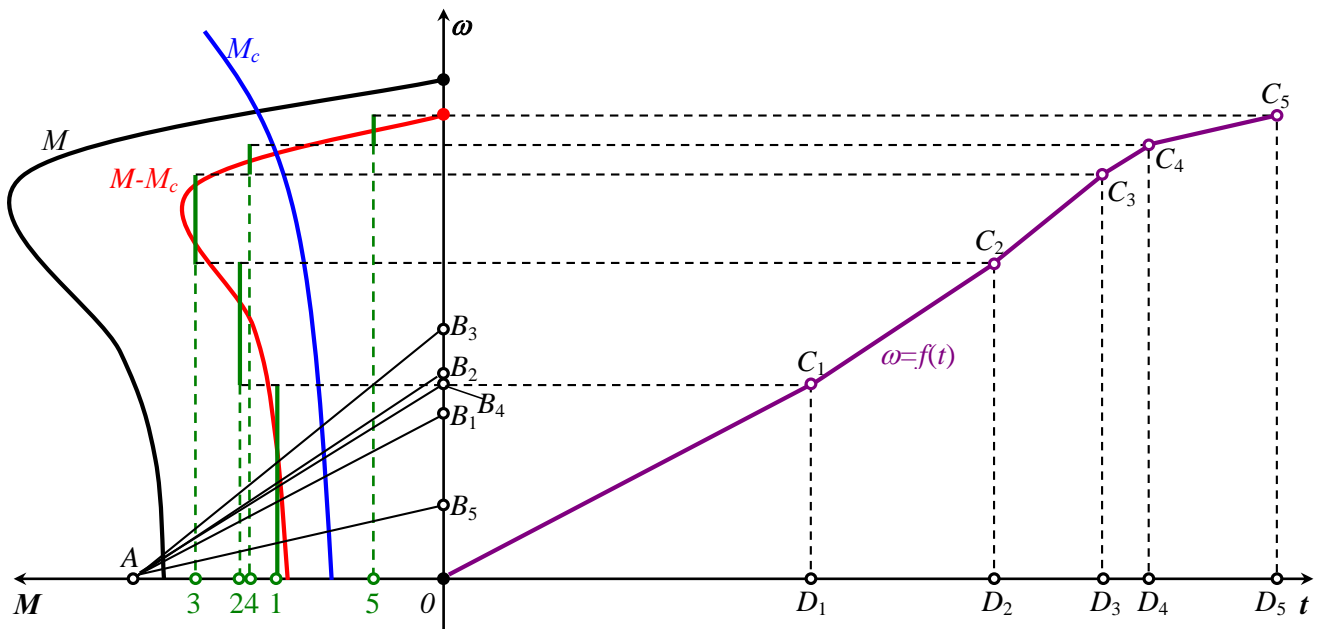


Рисунок 13 – Застосування методу пропорцій для випадку пуску приводу вентилятора з короткозамкнутим двигуном

Дійсно, $OB_1/OA = C_1D_1/OD_1$, але $OB_1 = M_1 - M_c$; $OA = J$; $C_1D_1 = \Delta\omega_1$, отже, відрізок OD_1 згідно рівнянню (29) відповідає часу пуску на першій ділянці, тобто $OD_1 = \Delta t_1$.

Провівши аналогічну побудову для всіх наступних ділянок, будемо криву швидкості обертання двигуна і знаходимо шуканий час пуску приводу.

При побудові слід враховувати масштаби величин, які зв'язані між собою співвідношенням:

$$\frac{m_M}{m_J} = \frac{m_\omega}{m_t}, \quad (30)$$

де m_M – масштаб моменту;

m_J – масштаб моменту інерції J ;

m_ω – масштаб швидкості обертання двигуна;

m_t – масштаб часу.

Якщо задатися масштабами трьох величин: моменту, швидкості, часу, то з приведеного співвідношення знаходиться масштаб четвертої величини – моменту інерції J .

Подібний метод побудови кривої швидкості для визначення часу пуску застосовний також для двигунів постійного струму, якщо механічні характеристики не можуть бути виражені аналітично.

Приведений метод розрахунку може бути застосований не тільки для пускових, але і для гальмівних режимів роботи (рис. 14). В наслідок того, при

5. ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

При виконанні курсового проекту необхідно користатися конспектом лекцій, за першим розділом рекомендується літературне джерело [1 – 4, 10], за другим та третім [1, 5], за

Результати виконання курсового проекту представити у вигляді розрахунково-пояснювальної записки, виконаної відповідно до державного стандарту на виконання технічної документації.

Розрахункову частину роботи рекомендується виконувати в середовищі пакета "MathCAD" або Microsoft Office Excel.

Графічні побудови проводити на міліметровому папері розміру А1 з відповідною рамкою та основним надписом. Графічний матеріал додається до пояснювальної записки курсового проекту у вигляді додатків.



ЛІТЕРАТУРА

1. Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник / [А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, І.С. Трунова]. – Х.: ХНАДУ, 2016 – 292 с.
2. Cyber-Physical Systems for Clean Transportation: підручник / [Nadezhda Kunicina, Anatolijs Zabasta, Jeļena Pečerska, Andrej Romanov, Andrii Hnatov, Arhun Shchasiana Dziubenko Oleksandr, Kateryna Danylenko, Joan Peuteman, Natalia Morkun, Iryna Zavsiehdashnia, Vladimir Sistuk, Yurii Monastyrskiy, Sergey Ruban, Vitaliy Tron]. – Riga: RTU, 2021 – 370 p.
3. Control methods for critical infrastructure and Internet of Things (IoT): підручник / [Leonids Ribickis, Nadezhda Kunicina, Ojars Krumins, Anatolijs Zabasta, Andrejs Romanovs, Anastasija Zhiravecka, Igors Uteshevs, Rasa Bruzgiene, Joan Peuteman, Jelena Caiko, Kaspars Kondratjevs, Alina Galkina, Konstantins Kunicins, Jaroslavs Agofonovs, Antons Patlins, Damir Shodiev, Andrei Derushev, Andrii Hnatov]. – Riga: RTU, 2021 – 131 p.
4. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.
5. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
6. Теорія електроприводу: [метод. вказів. до лаб. робіт та самостійної роботи] / А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун. – Х. : ХНАДУ, 2021 – 65 с.
7. Hayes J. G., Goodarzi G. A. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. – 2018.
8. Теорія електроприводу: Методичні вказівки до практичних занять для студентів денної форми навчання що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / [А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун]. – Х. : ХНАДУ, 2020 – 75 с.
9. Аргун Щ.В. Электромобиль и его тяговый электропривод с асинхронным двигателем: монография / Щ. В. Аргун, А. В. Гнатов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 216 с..
10. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. – Newnes, 2019. – 483 p.
- 11.
12. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.
13. Попович М.І. Теорія електроприводу. – Київ: Техніка, 1998. – 462 с.
14. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
15. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: "Высшая школа", 1991. – 430 с.

16. Иванов А.А. Справочник по электротехнике. Изд. 5-е, перераб. и доп. – К.: "Вища школа" Головное издательство, 1984. – 304 с.
17. Энергетическая электроника / Под ред. Лабунцова В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
18. Руденко В.С. и др. Промышленная электроника. – К.: Техніка", 1979. – 499 с.
19. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И. – М.: Энергоиздат, 1982. – 364 с.
20. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 379 с.
21. Миллер Е.В. Основы теории электропривода. – М.: Высшая школа, 1968. – 408 с.

