

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«ЕП і СК ПТБДМ»
для студентів спеціальності 136 “Металургія”
усіх форм навчання
частина 1

—

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни “ЕП і СК ПТБДМ” для студентів спеціальності 136 “Металургія” усіх форм навчання частина 1 /Укл.: Ю.О. Крисан, Є.В. Васильєва. - Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2019. - 79 с.

Укладачі: Ю.О. Крисан, доцент, ктн;
Є.В. Васильєва, старший викладач.

Рецензенти: М.Л. Антонов, ктн;

Відповідальний
за випуск: Є.В. Васильєва, старший викладач.

Затверджено
на засіданні кафедри “ЕПА”
Протокол № 12
від “09” липня 2019.

Рекомендовано до видання
НМК ЕТФ
Протокол № 4
від “21” листопада 2019.

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Сучасний електропривод, його особливості, стан і напрямки розвитку	8
1.1 Елементи електропривода.....	8
1.2 Тенденції розвитку сучасного електропривода	8
2 Механіка електропривода	10
2.1 Елементи механічної частини електропривода.....	10
2.2 Рівняння механічного руху.....	11
2.3 Розрахункові схеми механічної частини електропривода	13
2.4 Багатомасові механічні системи	15
2.5 Типові статичні навантаження ЕП	16
2.6 Режими роботи електроприводів	17
3 Статичні характеристики виконавчих механізмів та електродвигунів	21
3.1 Механізми	21
3.2 Електродвигуни	25
3.3 Статичні механічна й електромеханічна характеристики електродвигуна постійного струму незалежного збудження	30
3.4 Режими роботи електродвигунів	38
3.5 Статичні характеристики ДПС НЗ в гальмівних режимах ...	39
3.5.1 Режим рекуперативного гальмування	39
3.5.2 Режим гальмування противвімкненням	41
3.5.3 Режим електродинамічного гальмування	47
3.5.4 Використання електричних способів гальмування електроприводів	51
3.6 Статичні механічні характеристики електродвигунів постійного струму послідовного збудження	52
3.7 Статичні характеристики ДПС ПЗ у гальмівних режимах...	58
3.7.1 Режим гальмування противвімкненням	58
3.7.2 Режим електродинамічного гальмування	61
3.8 Статичні механічні характеристики асинхронних двигунів	64
3.8.1 Заступна схема АД	65
3.8.2 Аналітичний вираз механічної статичної характеристики АД	67

3.9 Механічна статична характеристика АД у координатах S й M $M = f(S)$	69
3.10 Аналіз механічної характеристики, поданої у вигляді формули Клосса	72
3.11 Механічна характеристика АД у координатах ω та M (залежність $\omega = f(M)$)	73
3.12 Узагальнення властивостей механічних характеристик АД.	76
Перелік посилань	79
Частина 2	

ВСТУП

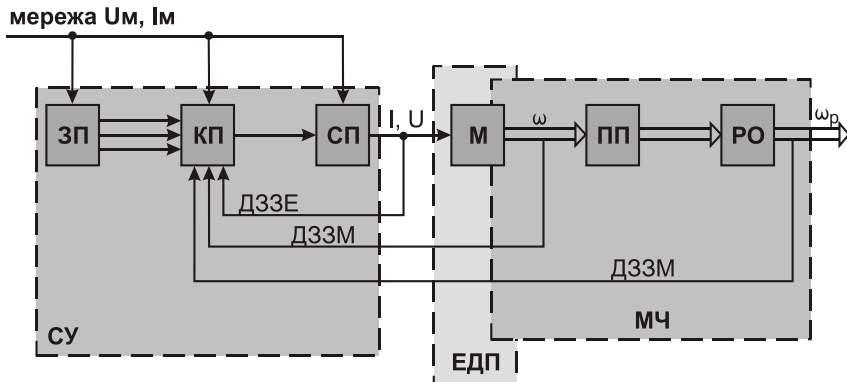
Будь-який розвинений машинний пристрій складається з трьох основних частин:

- двигуна;
- передавального механізму;
- робочого органа.

Основним видом привода зараз є електропривод (ЕП), обсяг його використання незрівнянно більше усіх приводів інших типів разом узятих.

Електропривод – це електромеханічна система, що складається з електродвигунового, перетворювального, передавального та керуючого пристроїв, призначена для приведення до руху виконавчих органів робочої машини, й керування цим рухом.

Структурна схема системи автоматизованого ЕП наведена на рисунку 1.1.



Рисунку 1.1 – Структурна схема автоматизованого ЕП.

На рисунку прийняті такі умовні позначення:

ЗП – задавальний пристрій;

КП – керуючий пристрій;

СП – силовий перетворювач (перетворювальний пристрій);

М – електродвигун (електромашинний перетворювач);

ПП – передавальний пристрій;

PO – робочий орган;

$ДЗЗЕ$, $ДЗЗМ$ – давач зворотнього зв'язку електричний, механічний відповідно;

$СК$ – система керування (складається із силової частини $\tilde{N}\tilde{I}$ й інформаційної частини);

$ЕДП$ – електродвигуневий пристрій;

$МЧ$ – механічний передавальний пристрій (механічна частина) ЕП;

I_m , U_m – струм і напруга мережі живлення відповідно;

I , U – струм і напруга живлення двигуна відповідно;

ω_p – кутова швидкість робочого органу.

Електрична енергія, що споживається з мережі (автономного джерела), і яка має нерегульовні параметри I_m , U_m у силовій частині $СП$ системи керування $СК$ перетворюється у регульовні параметрами I , U , а звідти подається на обмотку електродвигуна $М$, де вона перетворюється у механічну потужність на валу двигуна з кутовою швидкістю ω . Механічна енергія від вала двигуна подається механічному перетворювальному пристрою $ПП$, який здійснює подальше її перетворення. Ця енергія надходить на робочий орган $РО$ машини. Керуючий пристрій $КП$ здійснює керування силовим перетворювачем $СП$ одержуючи командні сигнали від задавального пристрою $ЗП$ та поточну інформацію про стан $ЕП$ й технологічного процесу, що виконує $ЕП$, за допомогою давачів зворотних зв'язків електричних $ДЗЗЕ$ або механічних $ДЗЗМ$. За допомогою цих давачів струм, напруга, потужність електродвигуна; зусилля, швидкість, момент, положення робочого органу (або інші механічні, електричні, теплові й таке інше) параметри перетворюються у пропорційні цим параметрам електричні сигнали. Ці сигнали й подаються у керуючий пристрій $КП$. Тут вони порівнюються з заданими і при наявності розузгодження їх у керуючому пристрої $КП$ вироблюється керуючий сигнал, що діє на силовий перетворювач $\tilde{N}\tilde{I}$, який у свою чергу діє на електричний двигун $\dot{I}$ своїми зміненими параметрами I , U у напрямку усунення розузгодження, що виникло, з необхідною точністю й швидкодією.

Таким чином, у структурній схемі *ЕП* можна виділити три основних блока:

- система керування *СК*, яка складається з силової перетворювальної частини *СП* та інформаційної частини *ІСК*, до якої належать:

- 1) керуючий пристрій *КП*;
- 2) задавальний пристрій *ЗП*;
- 3) система давачів зворотних зв'язків *ДЗЗ*;

- електродвигуневий пристрій *ЕДП*;

- механічна частина – *МЧ*, який складається з рухомої частини електродвигуна й усієї механічної частини *ПП* від двигуна до робочого органу *РО*.

ЕП органічно зливаються з робочим механізмом і машиною у єдину систему, дозволяє виконати раціональне компонування привода і системи, підвищити технічні, економічні й ергономічні показники.

1 СУЧАСНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЙОГО ОСОБЛИВОСТІ, СТАН І НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ

1.1 Елементи електропривода

Усе різноманіття елементів ЕП поділяють на дві групи:

- силові елементи (через них проходить основний потік енергії);
- елементи керування (для перетворення, підсилення і передачі сигналів, до них відносять також елементи захисту).

Силові елементи

Електромашинні джерела напруги(генератори та електромашинні підсилювачі);

Силові перетворювачі (електромашинні та статичні):

- перетворювачі змінної напруги у постійну й навпаки;
- перетворювачі постійної напруги у постійну (імпульсні перетворювачі) й змінної напруги у змінну (перетворювачі частоти при нерегульованій та регульованій частоті).

Електричні двигуни (постійного та змінного струму);

Електричні апарати (контактні й безконтактні);

Елементи механічної частини електропривода (передачі й перетворювальні ланки)

Елементи керування

1. Електричні апарати (вимикачі й перемикачі, реле, запобіжники тощо);
2. Давачі;
3. Електричні машини систем автоматики;
4. Коректувальні елементи;
5. Блочні елементи керування.

1.2 Тенденції розвитку сучасного електропривода

Сучасному ЕП також притаманні такі тенденції розвитку.

1 тенденція. Розширення сфери застосування регульованого ЕП за рахунок використання ЕП змінного струму з мікропроцесорним

керуванням. Розширення сфери застосування спеціальних ЕП (побут, побутова техніка, космос, освоєння світового океану і морських глибин і таке інше) [3].

2 тенденція. Удосконалення ЕП пов'язані з науко-технічним прогресом, особливо досягнення матеріалознавства та мікроелектроніки. Розробка електродвигунів нових серій, особливо змінного струму та крокових електроприводів [4, 5].

3 тенденція. Підвищення технологічних вимог до динамічних та точнісних показників ЕП, розширення та ускладнення функцій ЕП, особливо пов'язаних з керуванням технологічними процесами.

4 тенденція. Підвищення рівня автоматизації стимулює створення роботів, маніпуляторів, гнучких автоматичних ліній і виробництв.

5 тенденція. Уніфікація елементної бази ЕП, створення комплектних ЕП на базі модульно-блочного принципу, мікропроцесорних ЕП.

6 тенденція. Спрощення механічної частини ЕП, спрощення їх кінематичного ланцюга за рахунок удосконалення функцій регулювання безпосередньо електромашинного перетворювача. Створення лінійних та зворотньо-поступальних необертових електричних двигунів. Конструктивне поєднання двигуна й виконавчого механізму. Вбудова електродвигуна у механічну конструкцію механізму і таке інше.

2 МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Механічний рух від вала електродвигуна до робочого органа (або навпаки, від робочого органа до двигуна) здійснюється за допомогою механічного передавального пристрою (МПП), який, у загальному випадку, складається з певної кількості елементів механічної частини електропривода.

Найпростіша структурна схема електропривода має вигляд поданий на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 - Найпростіша структурна схема ЕП.

За величиною електрична потужність двигуна ($P_{ел}$), механічні потужності ЕД ($P_{мх1}$), МПП ($P_{мх2}$) та РО ($P_{мх3}$) різняться урахуванням значень відповідних ККД.

Будову і складність МПП визначають особливості динамічних станів РО, характер технологічного процесу, властивості ЕД та його системи регулювання. У розвинених МПП регулювання координат і зміна характеру руху здійснюється не тільки з боку ЕД, а і з боку МПП.

Тобто чим більше будуть удосконалені двигун та його системи керування, чим більше на них можна буде реалізувати різних динамічних станів, тим простішим буде МПП [6, 7].

2.1 Елементи механічної частини електропривода

Механічна частина ЕП у більшості складається з певної кількості передач, якщо електродвигун й робочий орган обертового руху. Якщо ж робочий орган поступального, або зворотно-поступального рухів, а двигун обертовий, то механічна частина повинна мати й перетворювальні елементи, що перетворюють вид механічного руху.

Основними елементами МПП є

- передачі;
- перетворювальні ланки.

Передачі (зубчасті, черв'ячні, ланцюгові тощо) не перетворюють вид механічного руху, а тільки змінюють параметри обертального руху.

До перетворювальних ланок належать:

- зубчасто-рейковий механізм;
- кривошипний механізм;
- кулачковий механізм.

Для перетворювальних механізмів з погляду кінематики характерним є відношення вихідної швидкості V поступального руху до вхідної кутової швидкості ω .

У залежності від цього всі перетворювальні механізми слід поділити на дві групи.

1-а група $\frac{V}{\omega} = Const :$

- зубчасто-рейковий перетворювач;
- гвинт з гайкою й таке інше.

2-а група $\frac{V}{\omega} = Var :$

- кривошипний механізм;
- кулачковий механізм і таке інше.

Для обертальних ЕП з передачами

$$\frac{\omega_p}{\omega_i} = Const ,$$

де ω_p – кутова швидкість робочого органу;

ω_i – кутова швидкість ротора електродвигуна, або будь-якого елемента кінематичного ланцюга від двигуна до робочого органу.

2.2 Рівняння механічного руху

Елементи механічної частини електродвигуна ЕП або обертаються або рухаються поступально з різною швидкістю, але

мають різну жорсткість, мають різні маси, або моменти інерції, а з'єднання між ними, найчастіше, мають проміжки.

Механічний рух будь-яких елементів ЕП (і силових і елементів керування) описується за допомогою законів електромеханіки. У першу чергу, це другий закон Ньютона, який описує рух матеріального тіла.

Якщо тверде тіло рухається поступально, то:

$$\sum \bar{F} = m \cdot \frac{d\bar{v}}{dt}, \quad (2.1)$$

якщо обертається навколо своєї осі:

$$\sum \bar{M} = J \cdot \frac{d\bar{\omega}}{dt}. \quad (2.2)$$

Тут $\sum \bar{F}$, $\sum \bar{M}$ - векторні суми відповідно сил і моментів, що діють на тіло;

m , J - відповідно маса і момент інерції тіла;

$\frac{d\bar{v}}{dt}$, $\frac{d\bar{\omega}}{dt}$ - відповідно прискорення й кутове прискорення тіла

що рухається поступально, або обертається.

Рівняння (2.1) й (2.2) дозволяють однозначно визначити характер механічного руху електропривода.

$$\left. \begin{array}{l} \sum F = 0 \\ \sum M = 0 \end{array} \right\} \text{привод рухається з усталеною швидкістю, або}$$

знаходиться у стані спокою.

(2.3)

$$\left. \begin{array}{l} \sum F \neq 0 \\ \sum M \neq 0 \end{array} \right\} \text{привод рухається з прискоренням.} \quad (2.4)$$

Знаходження залежності швидкості руху у часі $\omega(t)$ й $v(t)$ здійснюється шляхом рішення (інтегрування) рівнянь руху (2.1) чи (2.2), при цьому повинні бути задані:

- маса або момент інерції;
- характер дії сил (зусиль) або моментів.

2.3 Розрахункові схеми механічної частини електропривода (ЕП)

Рух кожного з елементів механічної частини ЕП можна описати одним з рівнянь (2.3) або (2.4). Найбільш зручно таке урахування здійснити шляхом зведення моментів, зусиль, моментів інерції та мас.

У результаті зведення реальна кінематична схема замінюється розрахунковою енергетично еквівалентною схемою, основою якої є той елемент, рух якого розглядається.

Суть операції зведення розглянемо на прикладі електропривода піднімальної лебідки. Кінематична схема якого подана на рисунку 2.2.

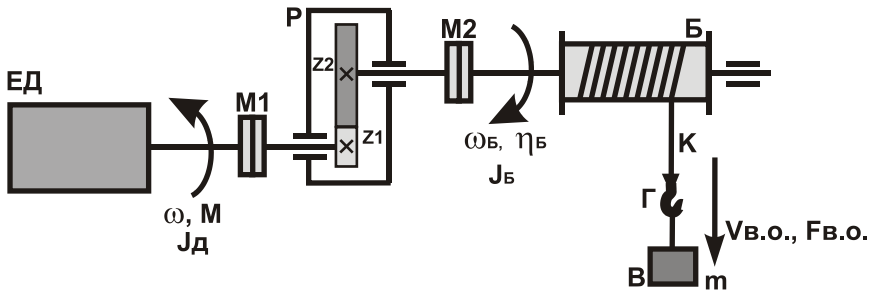


Рисунок 2.2 – Реальна кінематична схема пристрою.

- ЕД** – електродвигун;
М1, М2 – з'єднувальні муфти;
Р – редуктор;
Б – барабан;
В – вантаж;
Г – гак;
К – канат.

Зведення моменту навантаження здійснюється, виходячи з рівності механічної потужності навантаження двигуна у реальній й в еквівалентній схемах.

Енергія спрямовується від двигуна до виконавчого органу, а баланс потужності у цьому випадку має вигляд

$$M_C \cdot \omega = \frac{F_{B.O} \cdot V_{B.O}}{\eta_P \cdot \eta_B},$$

звідки

$$M_C = \frac{F_{B.O} \cdot V_{B.O}}{\omega \cdot \eta_P \cdot \eta_B} = \frac{F_{B.O} \cdot \rho}{\eta_P \cdot \eta_B} \quad [\text{Н} \cdot \text{м}],$$

де M_C – зведений до вала двигуна момент навантаження (статичний момент опору), [Н·м];

ω – кутова швидкість вала двигуна $[\frac{1}{\text{с}}]$;

$F_{B.O} = m \cdot g$ - сила ваги, [Н];

$V_{B.O}$ - лінійна швидкість піднімання вантажу, [м/с];

$\rho = \frac{V_{B.O}}{\omega}$ - радіус зведення, [м];

m - маса вантажу, [кг].

Зведення моментів інерції та мас елементів здійснюється виходячи з рівності запасу кінетичної енергії у реальній та у еквівалентній схемах.

$$\frac{J \cdot \omega^2}{2} = \frac{J_D \cdot \omega^2}{2} + \frac{J_B \cdot \omega_B^2}{2} + \frac{m \cdot V_{B.O}^2}{2},$$

звідки

$$J = J_D + J_B \frac{\omega_B^2}{\omega^2} + m \frac{V_{B.O}^2}{\omega^2},$$

або

$$J = J_D + \frac{J_B^2}{i^2} + m \cdot \rho^2,$$

де J - зведений до вала двигуна момент інерції МПП, [кг·м²];

J_D - момент інерції двигуна, муфти **M1** й шестерні **Z1**, [кг·м²];

J_B - момент інерції барабана, муфти **M2** й шестерні **Z2**, [кг·м²].

Таким чином, для зведення моменту інерції обертового елемента до вала двигуна слід поділити його момент інерції на квадрат передаточного числа ділянки кінематичного ланцюга проміж двигуном та цим елементом.

Для зведення маси елемента, що рухається поступально, слід помножити його масу на квадрат радіуса зведення ділянки кінематичного ланцюга проміж двигуном та цим елементом.

2.4 Багатомасові механічні системи

При проведенні операції зведення реальної схеми механічної частини ЕП до розрахункової було знехтувано жорсткістю елементів. Для урахування впливу таких деформацій вводять поняття коефіцієнтів жорсткості пружних елементів. При поступальному русі характер коефіцієнта жорсткості лінійний C_L . При обертовому русі коефіцієнт жорсткості кручення $C_{\text{ЕВ}}$. Для двомасової системи ураховується один пружний елемент реальної схеми.

Для пружного елемента, що рухається поступально, коефіцієнт жорсткості C_L при розтяганні або стисканні є коефіцієнтом пропорційності між лінійною деформацією елемента та зусиллям, що виникає у ньому

$$C_L = \frac{F_n}{\Delta L}, [H/M],$$

де F - зусилля, що виникає у пружному елементі при розтяганні, або стисканні його, [Н];

ΔL - лінійна деформація елемента при його розтяганні або стисканні, [м].

Для пружного елемента (вала) при крученні коефіцієнт жорсткості C_{KP} є коефіцієнтом пропорційності між кутовою деформацією вала та моментом, що виникає на ньому

$$C_{KP} = \frac{M_n}{\Delta\varphi}, [\text{Н}\cdot\text{м}]$$

де M_n - момент, що виникає на пружному елементі (на валу) при його обертанні, [Н·м];

$\Delta\varphi$ - кутова деформація вала при його обертанні, [радіан].

2.5 Типові статичні навантаження ЕП

Електромагнітний момент (зусилля) двигуна є вихідною величиною системи автоматизованого електропривода й вхідною величиною його механічної частини, а решта моментів або зусиль визначають його статичне навантаження

$$M_c(F_c).$$

Для будь-якої розрахункової схеми це навантаження (для конкретного ЕП) залишається одним і тим же.

Усі ці моменти (зусилля) навантаження, які прикладені до механічної частини ЕП можна поділити на дві групи:

- корисні навантаження робочого органу;
- моменти й сили механічних втрат.
-

$$M_c = M_{KOP\Sigma} + \Delta M, [\text{Н}\cdot\text{м}]$$

де $M_{KOP\Sigma}$ - сумарний момент корисного навантаження;

ΔM - сумарний зведений момент втрат (включає й момент механічних втрат електродвигуна).

Моменти корисного навантаження у різних виробничих механізмах (робочих машинах) мають різний характер. Усі механізми за характером моментів навантаження можна поділити на чотири категорії (класи). Критерієм класифікації є залежність навантаження від швидкості, так звана механічна характеристика виробничого механізму. Для обертальних ЕП вона має вигляд

$$\omega = f(M_c), \quad (2.5)$$

де M_c - зведений до вала двигуна статичний момент опору, [Н·м];

ω - зведена до вала двигуна кутова швидкість (кутова швидкість двигуна), $[\frac{1}{c}]$.

За характером взаємодії з ЕП усі сили й моменти поділяються на

- активні (створюються зовнішніми джерелами механічної енергії незалежно від напрямку руху ЕП. Характерним є прояв активних сил й моментів у вантажопіднімальних механізмах);

- реактивні (виникають як реакція на активний рушійний момент. Ці навантаження завжди діють у напрямку, протилежному напрямку руху ЕП, вони змінюють свій напрямок при реверсі швидкості електродвигуна).

Отже, усі реактивні характером поділити на:

- навантаження сухого тертя (залежить від значень коефіцієнтів тертя: матеріалу, характеру тех. процесу тощо);

- навантаження в'язкого тертя (виникає при динамічних процесах у механічній системі електропривода при деформаціях валів, муфт, канатів тощо);

- навантаження вентиляційного типу (виникає на розвинених частинах елементів механічної частини ЕП й самого електродвигуна, що обертаються).

2.6 Режими роботи електроприводів

Розглянемо одномасову розрахункову схему механічної частини ЕП, її рівняння механічного руху мають вигляд:

$$F - F_c = F_d \quad (2.6)$$

- для поступального руху

$$M - M_c = M_d \quad (2.7)$$

- для обертального руху.

В рівняннях (2.6) і (2.7) усі параметри зведені до вала двигуна:

F - зусилля, яке створює електродвигун, [Н];

M - момент електродвигуна, [Н·м];

F_c - статичне зусилля опору, [Н];

M_c - статичний момент опору, [Н·м];

$F_d = m \frac{dv}{dt}$ - динамічна сила, [Н];

m - маса, [кг];

v - лінійна швидкість, [м/с];

$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$ - динамічний момент, [Н·м];

J - момент інерції, [кг·м²];

ω - кутова швидкість, [1/с].

Фізичні одиниці зусиль та моментів такі:

$$F, F_c, F_d \rightarrow [кг \cdot \frac{м}{с^2}] \rightarrow [кг \cdot м \cdot с^{-2}] \rightarrow [Н];$$

$$M, M_c, M_d \rightarrow [кг \cdot м^2 \cdot с^{-2}] \rightarrow [\frac{кг \cdot м}{с^2} \cdot м] \rightarrow [Н \cdot м].$$

Так, якщо динамічний момент відсутній $M_d = 0$, то

$$M - M_c = 0 \quad (2.8)$$

$$M = M_c$$

Момент двигуна дорівнює статичному моменту опору – усталений рух (або спокій). Тобто ЕП рухається з рівномірною швидкістю (або нерухомий).

При неусталеному режимі згадані моменти не дорівнюють один одному, є динамічний момент, рух буде прискорений або сповільнений.

Таблиця 2.1 – Режим роботи ЕП.

1 Двигуневий, розгін $+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ Двигуневий, сповільнення	$ M > M_c $	Розгін при підніманні вантажу
	$ M < M_c $	Сповільнення на ходу при підніманні вантажу
2 Двигуневий, розгін $+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$	—	Розгін при силовому спуску вантажу
3 Гальмівний $-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ Піднімання	—	Електричне гальмування при підніманні вантажу
4 Гальмівний, сповільнення $-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ гальмівний, прискорення	$ M > M_c $	Електричне гальмування при спуску вантажу
	$ M < M_c $	Прискорення вантажу при гальмівному спуску
5 Двигун вимкнено від мережі $-M_c = J \frac{d\omega}{dt}$	$M = 0$	Самогальмування вантажу при підніманні
6 Двигун вимкнено від мережі $+M_c = J \frac{d\omega}{dt}$	$M = 0$	Саморозгін вантажу при спуску

Таблиця 2.1 наочно демонструє що:

а) знак „+” перед значенням моменту M двигуна вказує на двигуневий режим його роботи;

б) знак „-” перед значенням моменту M двигуна вказує на гальмівний режим його роботи;

в) знак „+” перед значенням статичного моменту M_C вказує на режим при спуску вантажу незалежно від того, двигуневий чи гальмівний режим двигуна;

г) знак „-” перед значенням статичного моменту M_C вказує на режим при підніманні вантажу незалежно від того, двигуневий чи гальмівний режим роботи двигуна;

д) при відімкненні двигуна від мережі неусталений рух ЕП здійснюється за рахунок накопиченої кінетичної чи потенціальної енергій.

Основною задачею у галузі механіки ЕП є визначення швидкості V та потужності P при усталеному режимі й визначення швидкості V , шляху S та потужності P у функції часу t у неусталених перехідних режимах

$$V, S, P = f(t).$$

3 СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ ТА ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

3.1 Механізми

В електродвигуні статична характеристика двигуна відповідає статичним характеристикам виконавчого механізму.

Для обертальних електроприводів залежність між зведеними до вала електродвигуна швидкістю та моментом опору механізму називають механічною характеристикою виконавчого механізму

$$\omega = f(M_c)$$

де ω - зведена до вала електродвигуна кутова швидкість виконавчого органу механізму, $[1/c]$;

M_c - зведений до вала електродвигуна статичний момент опору виконавчого органу механізму, $[H \cdot m]$.

Усі виконавчі механізми умовно можна поділити на чотири групи. Для цих груп можна записати одну загальну залежність, яка являє собою механічну характеристику механізму

$$M_c = M_0 + (M_{c_{ном}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^j, \quad (3.1)$$

де M_0 - момент статичного опору механізму на подолання тертя у рухомих частинах механізму, $[H \cdot m]$;

$M_{c_{ном}}$ - статичний момент опору механізму при номінальній кутовій зведеній швидкості $\omega_{ном}$, $[1/c]$;

j - показник степеня, що характеризує зміну момента опору при зміні кутової швидкості.

Величина цього показника у решті решт і є тим параметром, що суттєво впливає на вид механічної характеристики, а отже і визначає належність механізму то тієї, чи іншої групи (класу), дивись рисунок 3.1.

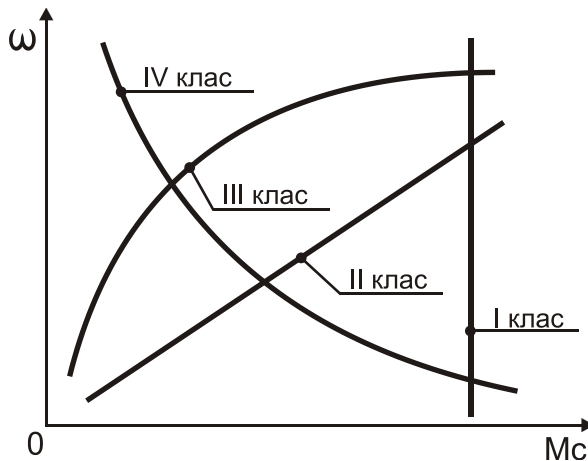


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики виконавчих механізмів.

I клас. Статичний момент опору механізмів не залежить від величини швидкості. Механічна характеристика таких механізмів має вигляд прямої лінії, паралельної осі ординат.

У відповідності до рівняння (3.1) показник степеня j впливу швидкості на момент опору відсутній $j = 0$. При такому значенні j рівняння (3.1) буде мати вигляд

$$M_c = M_{c_{ном}},$$

тобто це пряма відступає від осі ординат на відстань $M_{c_{ном}}$.

До першого класу можна віднести вантажопіднімальні машини, лебідки, механізми подачі верстатів та більшість механізмів, у яких основним моментом опору є тертя (конвеєри).

II клас. Статичний момент опору механізмів зростає при зростанні швидкості лінійно, на лінійно зростаюча механічна характеристика, вона має вигляд похилої прямої. Тобто показник степеня j впливу швидкості на момент опору – 1

$$j = 1.$$

При такому значенні j рівняння (3.1) буде мати вигляд

$$M_c = M_0 + \frac{(M_{c_{\text{юм}}} - M_0) \cdot \omega}{\omega_{\text{юм}}},$$

$$M_c = M_0 + M'_c \cdot \omega, \quad (3.2)$$

де $M'_c = \frac{(M_{c_{\text{юм}}} - M_0)}{\omega_{\text{юм}}}$ - стала величина.

Для спрощення, у багатьох випадках можна знехтувати M_0 тоді ця характеристика пройде через початок координат, а рівняння (3.2) набуде вигляду $y = k \cdot x$, тобто рівняння прямої, що проходить через початок координат.

Класичний приклад класу – генератор постійного струму незалежного збудження, що працює на сталий зовнішній опір.

III клас. Статичний момент опору нелінійно збільшується при зростанні швидкості, механічна характеристика є нелінійно зростаючою. Тому j – число більше одиниці, найчастіше

$$j = 1,8 - 2,2,$$

а у окремих випадках може бути

$$j = 3 - 4.$$

При таких значеннях j рівняння (3.1) буде мати вигляд

$$M_c = M_0 + \frac{M_{c_{\text{юм}}} - M_0}{\omega_{\text{юм}}} \cdot \omega^j,$$

$$M_c = M_0 + M''_c \cdot \omega^j, \quad (3.3)$$

де $M''_c = \frac{(M_{c_{\text{юм}}} - M_0)}{\omega_{\text{юм}}}$ - така ж сама стала величина.

Тобто набуває вигляду параболи.

До III-го класу належать відцентровані насоси, компресори, гребні гвинти повітряних та водяних суден, сепаратори тощо, але класичним прикладом є вентилятор. Їх чудова властивість – при малих швидкостях – навантаження мале. Тобто фізично їх практично неможливо запустити до руху під навантаженням (запуск при неробочому ході).

IV клас. статичний момент опору зменшується нелінійно при збільшенні швидкості тобто механічна характеристика є нелінійно-спадною. Тобто j є число менше нуля, головним чином $j = -1$.

При таких значеннях j рівняння (3.1) буде мати вигляд

$$M_c = M_0 + \frac{M_{c_{ном}} - M_0}{\omega_{ном}} \cdot \omega^{-1},$$

$$M_c = M_0 + \frac{M'}{\omega}, \quad (3.4)$$

де $M' = \frac{M_{c_{ном}} - M_0}{\omega_{ном}}$ - така ж сама стала величина.

Тобто рівняння (3.4) має вигляд рівняння обернено-пропорційної залежності. А при знехтуванні M_0 , рівняння набуває вигляду звичайної симетричної гіперболи.

Прикладом механізмів IV класу є механізми головного руху оброблювальних верстатів різанням (токарні, фрезерні й інші верстати). Тут чим більшою буде швидкість механізму, тим меншу слід мати подачу – менший момент опору (чистова обробка) і навпаки (чорнова обробка, обдирання).

Таблиця 3.1 – Якісна характеристика класів виробничих механізмів.

Клас ви-робни-чого меха-нізму	Показник ступеня у рівнянні (3.1)	Перетворення рівняння (3.1)	Аналітичний вираз рівняння (3.1) (канонічний)	Назва залежності
Клас 1	$j = 0$	$M_c = M_{c_{ном}}$	$Y = A$	Пряма паралельна осі ординат
Клас 2	$j = 1$	$M_c = M_0 + \frac{M_{c_{ном}} - M_0}{\omega_{ном}} \cdot \omega$	$Y = A \cdot X + B$	Похила пряма
Клас 3	$j = 2$	$M_c = M_0 + \frac{M_{c_{ном}} - M_0}{\omega_{ном}^2} \cdot \omega^2$	$Y = A \cdot X^2 + B$	Парабола
Клас 4	$j = -1$	$M_c = M_0 + \frac{M_{c_{ном}} - M_0}{\omega_{ном}} \cdot \omega^{-1}$	$Y = \frac{A}{X} + B$	Обернено-пропорційна залежність

Слід відзначити, що у реальних умовах реальні механізми мають низку властивостей, із-за яких важко однозначно й цілком визначено віднести його до одного з чотирьох названих класів. Тому поділ на такі класи у певній мірі є умовним.

3.2 Електродвигуни

Для обертальних електродвигунів залежність кутової швидкості електродвигуна від його обертового моменту називають механічною характеристикою електродвигуна:

$$\omega = f(M),$$

де ω - швидкість електродвигуна, $[1/c]$;

M - електромагнітний обертовий момент, який розвиває електродвигун, $[H \cdot m]$.

Майже усі електродвигуни мають швидкість, що є убуючою (спадною) функцією моменту двигуна.

Ступінь зменшення швидкості у різних електродвигунів різний й характеризується жорсткістю механічної характеристики.

Жорсткість механічної характеристики електродвигуна

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (3.5)$$

тобто відношення різниці електромагнітних моментів двигуна у будь-яких сусідніх точках 1 й 2 характеристики до відповідної різниці швидкостей двигуна у тих же точках.

У більшості випадків на робочих ділянках механічна характеристика має від'ємну жорсткість

$$\beta < 0.$$

Якщо механічна характеристика прямолінійна, її ступінь жорсткості постійний

$$\beta = const,$$

а якщо нелінійна, її ступінь жорсткості не залишається постійним

$$\beta = Var$$

й визначається у цьому випадку згідно (3.5) в кожній точці характеристики як похідна моменту від кутової швидкості

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}.$$

Усі електродвигуни можна поділити на чотири групи (класи) з приблизно однаковим характером зміни жорсткості механічної характеристики у кожному класі, дивись рисунок 3.2.

I клас. Електродвигуни мають абсолютно жорстку механічну характеристику. При цьому швидкість електродвигуна при зміні його моменту залишається незмінною

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{\Delta M}{0} = \infty,$$

а характеристика являє собою пряму паралельну осі абсцис.

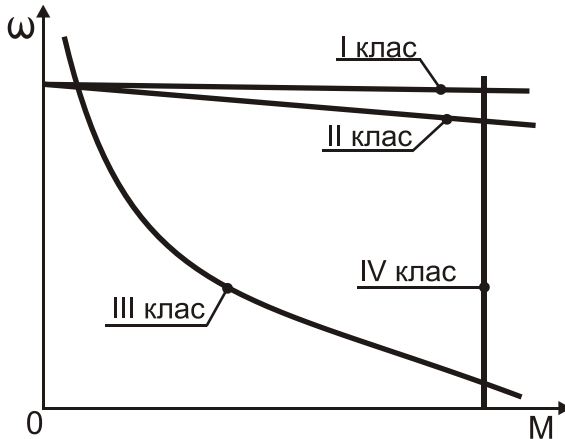


Рисунок 3.2 – механічні характеристики електродвигунів.

Таку характеристику має лише синхронні електродвигуни.

II клас. Двигуни мають жорстку характеристику. При цьому швидкість електродвигуна при збільшенні його моменту майже не змінюється. Характеристика являє собою похилу майже паралельну осі абсцис. Таку механічну характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного (паралельного) збудження, асинхронні електродвигуни у межах робочих реальних навантажень, та деякі інші.

III клас. Двигуни мають м'яку механічну характеристику. При цьому швидкість електродвигуна при зміні його моменту змінюється значно. Таку механічну характеристику мають електродвигуни постійного струму послідовного збудження, особливо у межах малих навантажувальних моментів. При цьому жорсткість механічної характеристики може мати малу за модулем від'ємну величину.

IV клас. Електродвигуни мають абсолютно м'яку механічну характеристику. При цьому момент електродвигуна залишається сталим при будь-якій його швидкості, тобто

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{0}{\Delta \omega} = 0,$$

а характеристика являє собою пряму лінію паралельну осі ординат. Таку характеристику має електродвигун постійного струму незалежного збудження при живленні його якірного кола від джерела струму.

У реальних умовах електродвигунам можуть мати властивості декількох класів. Так змінний ступінь жорсткості має асинхронний двигун, наприклад, в усьому діапазоні швидкостей двигуневому режиму (при зміні ковзання від нуля до одиниці):

$$1 > S > 0.$$

У межах робочих навантажень (ділянка характеристики АВ) характеристика пряmlinійна й має жорсткість

$$\beta = \text{const},$$

а на ділянці характеристики CD має гіперболічний характер, а жорсткість

$$\beta = \text{Var}.$$

На ділянці характеристики BFC жорсткість взагалі змінюється за вельми складними законами (дивись рисунок 3.3).

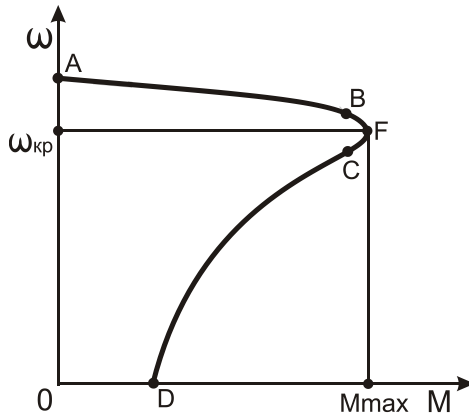


Рисунок 3.3 - Механічна характеристика АД (двигуневий режим).

Властивості більшості електродвигунів мати від'ємну жорсткість механічних характеристик обумовлює деякі суттєві переваги електродвигунів, як джерел механічної енергії порівняно з іншими неелектричними двигунами. Як уже відмічалось, при роботі електродвигуна й виконавчого механізму в усталеному режимі має місце рівновага рушійного моменту двигуна й моменту опору механізму.

Зміна моменту опору механізму на валу двигуна призводить до того, що швидкість електродвигуна й момент, що він створює можуть автоматично змінюватись, а привод буде продовжувати свою роботу стійко у новому усталеному режимі.

В електродвигунах роль автоматичного регулятора виконує е.р.с. двигуна.

Розглянемо цю властивість на прикладі привода з електродвигуном постійного струму незалежного збудження, рисунок 3.4.

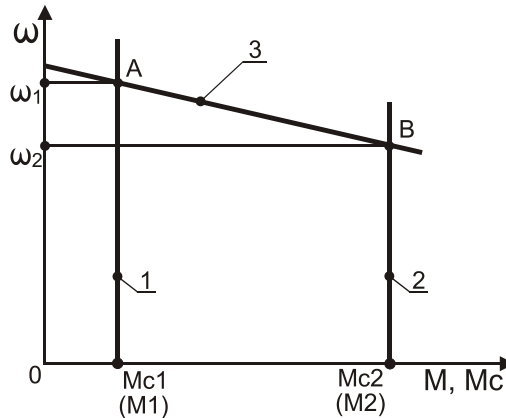


Рисунок 3.4 – Властивості електродвигунів автоматично зберігати усталений режим при змінюванні навантаження.

Лінія 3 є механічна характеристика електродвигуна, а лінії 1 та 2 – механічні характеристики виконавчого механізму першого класу для двох значень моменту опору M_{c1} та M_{c2} відповідно. Будемо

вважати, що характеристика 1 відповідає неробочому ходу механізму, а характеристика 2 – роботі його під навантаженням.

Спочатку при неробочому ході механізму коли

$$M_1 = M_{c1}$$

двигун працює зі швидкістю ω_1 . Потім зі збільшенням навантаження рух двигуна сповільнюється, завдяки чому зменшується його Е.Р.С. при цьому збільшується падіння напруги на якорі (у відповідності до рівняння рівноваги напруги двигуна $U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$) збільшується струм якоря й зростає момент, що розвиває двигун. Зростання моменту відбувається до тих пір, поки не встановиться рівновага моментів

$$M_2 = M_{c2},$$

у точці В. Якщо під навантаженням зменшити навантаження, двигун почне розганятися, збільшиться Е.Р.С. якоря, зменшиться падіння напруги, зменшиться струм, зменшиться момент і так до усталеного стану.

3.3 Статичні механічна й електромеханічна характеристики електродвигуна постійного струму незалежного збудження

Механічна характеристика потрібна для того щоб пов'язати електродвигун з механічним об'єктом (виконавчим механізмом). Знання механічних характеристик механізму (робочої машини)

$$\omega = f(M_c)$$

й механічних характеристик електродвигуна

$$\omega = f(M)$$

дає змогу поєднати машину і електродвигун в цілісну електромеханічну систему (електропривод).

Електромеханічна статична характеристика двигуна являє собою залежність швидкості електродвигуна від струму його головного кола

$$\omega = f(I)$$

в усталеному режимі роботи електродвигуна дозволяє визначити завантаження електродвигуна струмом при певних значеннях моменту електродвигуна.

У двигунах постійного струму незалежного збудження цей зв'язок безпосередній:

$$I = \frac{M}{C_m \cdot \Phi}; I = \alpha \cdot M;$$

де
$$\alpha = \frac{1}{C_m \cdot \Phi} = const.$$

Нормальна схема вмикання ДПС незалежного збудження подана на рисунку 3.5.

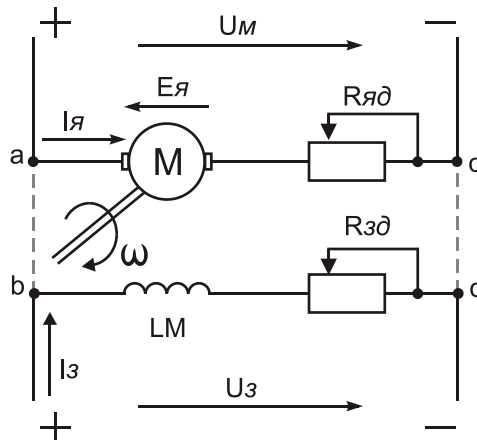


Рисунок 3.5 – Нормальна схема вмикання ДПС НЗ.

Тут ДПС незалежного збудження вважається практично одним і тим же суб'єктом, якщо двигун живиться від мережі не порівняної, а

більшої потужності. На практиці потужність мережі живлення дійсно значно більша потужності двигуна. Тобто не суттєво є провідники позначені на рисунку 3.5 штриховими відрізками ab й cd , чи їх нема, а джерела напруги U_3 та U_m різні, чи це одне й теж джерело.

Тобто якщо потужність мережі живлення дуже велика порівняно з потужністю електродвигуна, то внутрішній опір такого джерела мізерно малий і не залежить від струму мережі, тобто напруга такої мережі стала

$$U_m = const,$$

а ДПС за класичною схемою паралельного збудження буде мати у паралельному колі (колі збудження) напругу збудження U_3 , яка не залежить від величини струму – те ж саме, що й у ДПС незалежного збудження при живленні обмотки збудження від окремого джерела.

Реально в електроприводах якір двигуна й обмотка збудження живляться від різних, незалежних одне від одного джерел напругою U_m й U_3 , що дозволяє окремо регулювати напругу на якорі й на обмотці збудження та виконувати їх на різну номінальну напругу. Тільки при наявності мережі живлення постійного струму, обмотка збудження живиться від одного й того ж джерела, що і якірне коло, але і в цьому випадку, як вище вказувалось, струм збудження I_3 , не залежить від струму якоря I_y .

При усталеному русі прикладена до двигуна напруга мережі зрівноважується падінням напруги якірного кола $I_y \cdot R_y$ та наведеною у якорі е.р.с. E_y , тобто

$$U_m = I_y \cdot R_y + E_y \quad (3.6),$$

де I_y - струм якірного кола, $[A]$;

$R_y = R_{яв} + R_{яд}$ - сумарний опір якірного кола, що складається із внутрішнього опору якоря $R_{яв}$ та опору додаткового резистора $R_{яд}$ для регулювання струму якоря I_y , $[Ом]$.

До складу $R_{яв}$ входить опір обмотки якоря, опір обмотки додаткових полюсів та опір компенсаційної обмотки (якщо ці обмотки ДПС має).

Наведена у якорі двигуна є.р.с., як відомо, визначається за формулою:

$$E_{я} = C_{м} \cdot \Phi \cdot \omega \quad (3.7)$$

де $C_{м} = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$ – конструктивна електромашинна стала двигуна

(p - число пар полюсів, N - число активних провідників обмотки якоря, a - число пар паралельних віток (гілок) обмотки якоря) подана у системі одиниць СІ, а у практичній системі електромашинна стала

двигуна $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$; між $C_{м}$ та C_e зв'язок такий же як і між ω та π

– кутовою швидкістю $[1/c]$ та частотою обертання $[об/хв]$ - такий:

$$\omega [1/c] = \frac{2 \cdot \pi}{60} n [об/хв];$$

Φ - магнітний потік двигуна, якщо двигун скомпенсований і реакція якоря не проявляється, то це є основний потік, потік створений струмом збудження – м.р.с. обмотки збудження, $[B\delta]$.

У системі СІ фізичні одиниці формули (3.7) записуються так

$$E_{я} = C_{м} \cdot \Phi \cdot \omega$$

$$[B] = [B.O.] \cdot [B\delta] \cdot [1/c]$$

В.О. – відносні одиниці (безрозмірні)

$$[B\delta] = \frac{[B]}{[1/c]} = [B \cdot c]$$

Якщо у формулу (3.6) замість $E_{я}$ підставити її значення із формули (3.7) й вирішити рівняння відносно швидкості ω , одержимо

$$U_{м} = I_{я} \cdot R_{я} - C_{м} \cdot \Phi \cdot \omega,$$

$$\omega = \frac{U_{м} - I_{я} \cdot R_{я}}{C_{м} \cdot \Phi}. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.8) являє собою залежність швидкості ДПС від струму якоря, тобто

$$\omega = f(I_{\text{я}}),$$

таким чином рівняння (3.8) є аналітичним виразом електромеханічної характеристики ДПС незалежного збудження.

Для одержання аналітичного виразу механічної характеристики $\omega = f(M)$ необхідно скористуватись відомим виразом моменту для ДПС

$$M = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, [H \cdot м].$$

Якщо у формулу (3.8) замість $I_{\text{я}}$ підставити його значення із формули (3.9)

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_{\text{м}} \cdot \Phi}$$

то одержимо аналітичний вираз залежності ω від M , тобто механічної характеристики двигуна

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{м}} \cdot \Phi} - \frac{I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C_{\text{м}} \cdot \Phi}, \\ \omega &= \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{м}} \cdot \Phi} - M \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2 \cdot \Phi^2}, \text{ або} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{м}}}{\kappa_{\text{м}}} - M \cdot \frac{R_{\text{я}}}{\kappa_{\text{м}}}, \quad (3.10)$$

де $\kappa_{\text{м}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi, [Bб]$.

Якщо у рівняннях (3.8) й (3.10) коефіцієнти $U_{\text{м}}$, $C_{\text{м}}$, Φ і $R_{\text{я}}$ є константи, то математично ці рівняння мають вигляд типу

$$y = k \cdot x + b,$$

і описують прямі лінії, які не проходять через початок координат.

Отже, легко дійти висновку про прямолінійність стат. характеристик, якщо коефіцієнти можна вважати константами з огляду на фізичні процеси, що при цьому протікають.

Розглянемо їх докладніше.

$C_m = const$. Оскільки коефіцієнт залежить тільки від будови і конструктивних особливостей електродвигуна, тобто це конструктивна стала.

$U_m = const$. Для випадку потужності джерела живлення значно більшої потужності електродвигуна зовнішня характеристика джерела живлення $U_m = f(I_m)$ абсолютно жорстка, а напруга живлення незмінна.

$\Phi = const$. Якщо для зкомпенсованого електродвигуна незалежного збудження можна знехтувати реакцією якоря, то вислідним магнітним потоком машини буде незмінний магнітний потік збудження.

$R_y = R_{яв} + R_{я0}$. Якщо знехтувати нелінійною залежністю опору у перехідному контакті ковзання колектор – щітка. Величина цього опору менше сумарного опору решти елементів якірного кола і ним можна знехтувати.

Отже, можна стверджувати, що прямолінійні статхарактеристики мають повністю зкомпенсовані ДПС НЗ зі стабільною конструктивною сталою і „темною” комутацією.

Із рівнянь (3.8) й (3.10) витікає, що можна одержати різні швидкості при зміні вище перерахованих констант, тобто здійснювати регулювання швидкості привода.

Розглянемо вплив на статичні характеристики R_y – опору якірного кола, оскільки це необхідно буде при розгляді режимів роботи та механічних характеристик цих режимів.

Оскільки для ДПС з незалежним збудженням $\Phi = const$, то із виразу

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_y,$$

випливає, що $M = \kappa \cdot I_y$, тобто $M \equiv I_y$, а побудовані електромеханічна й механічна характеристики графічно є одним і тим же, а різняться вони між собою тільки масштабним лінійним коефіцієнтом

$$\kappa = C_m \cdot \Phi.$$

З огляду на все оце графічний вигляд характеристик для різних значень R_{γ} буде такий, як зображений на рисунку 3.6.

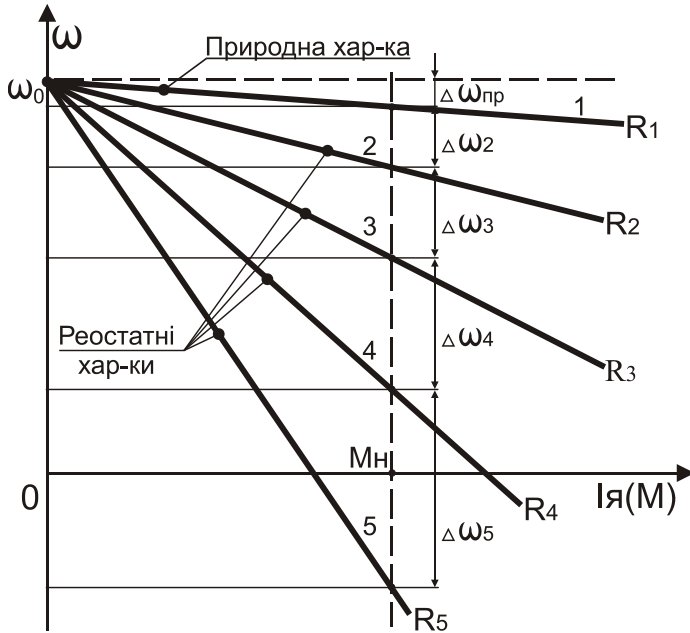


Рисунок 3.6 – Графічний вигляд характеристик.

$$R_{\gamma 01} = 0,$$

$$R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5.$$

Як видно із (3.8) і (3.10) та рисунка 3.6, при $M = 0$ ($I_{\gamma} = 0$) усі характеристики перетинаються в одній точці. У цій точці швидкість має певне значення й не залежить від величини опору якірного кола.

При роботі двигуна випадок $I_{\gamma} = 0$ можливий лише для режиму ідеального неробочого ходу, швидкість якого

$$\omega_0 = \frac{U_{\gamma}}{C_{\gamma} \cdot \Phi} \quad (3.11),$$

буде зватися швидкістю ідеального неробочого ходу.

При швидкості ідеального неробочого ходу е.р.с. якоря $E_{я}$ спрямована назустріч напрузі мережі і дорівнює їй за модулем.

Другий член рівнянь (3.8) й (3.10) являє собою перепад реальної швидкості відносно швидкості ідеального неробочого ходу – статичне падіння кутової швидкості електропривода.

$$\Delta\omega = I_{я} \frac{R_{я}}{C_{м} \cdot \Phi}, \quad (3.12),$$

$$\Delta\omega = M \cdot \frac{R_{я}}{C_{м}^2 \cdot \Phi^2}. \quad (3.13),$$

Таким чином, рівняння (3.8) й (3.10) враховуючи (3.11) та (3.12) можна подати у такому вигляді:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3.14),$$

Верхня характеристика яка наведена на рисунку 3.6 носить назву природної електромеханічної характеристики.

Природною характеристикою називають таку характеристику двигуна, яка одержується при відсутності опору у зовнішньому колі якоря й номінальних значеннях напруги і магнітного потоку двигуна.

Жорсткість природної характеристики залежить від внутрішнього опору якірного кола $R_{яв}$. відповідно перепад швидкості для природної характеристики буде

$$\Delta\omega_{кр} = I_{я} \frac{R_{яв}}{C_{м} \cdot \Phi_{ном}},$$

$$\Delta\omega_{кр} = M \cdot \frac{R_{яв}}{C_{м}^2 \cdot \Phi_{ном}^2}.$$

Швидкість можна виражати через відносні одиниці, при цьому за базу вибирають кутову швидкість ідеального неробочого ходу ω_0 . З урахуванням цього рівняння (3.14) можна записати

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \Delta\omega}{\omega_0},$$

звідки швидкість у в. о. буде

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \Delta\omega_* = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}, \text{ або}$$

$$\Delta\omega_* = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (3.15)$$

Формула перепаду швидкості (3.15) за зовнішнім виглядом тотожна з формулою ковзання S для електричних машин змінного струму:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

де ω_0 - синхронна швидкість;

але фізична суть $\Delta\omega_*$ й S різні.

Якщо у якірне коло додатково ввімкнути реостат, то одержані характеристики уже будуть штучними й носять назву реостатні характеристики (характеристики 2-5 рисунка 3.6). Реостатні характеристики мають меншу жорсткість, чим більший уведений у коло якоря додатковий опір, тим вони менш жорсткі.

3.4 Режими роботи електродвигунів

В електроприводі, крім двигунового режиму роботи, бувають й гальмівні режими роботи електродвигунів. Таких режимів електричного гальмування три:

- гальмування з віддачею енергії до мережі (рекуперативне гальмування);
- гальмування противвімкненням;
- електродинамічне гальмування.

В усіх цих режимах електродвигун працює як генератор, відмінність полягає у тому, як е.р.с. генератора зорієнтована відносно напруги мережі.

У рекуперативному режимі е.р.с. машини (як і у двигуновому режимі) спрямована назустріч напрузі мережі, проте стає більше цієї

напруги, що й зумовлює зміну напрямку струму, при переході з двигуневому режиму в гальмівний, на протилежний.

У режимі гальмування протиположним е.р.с. машини й напруга мережі діють узгоджено (в одному напрямку), а струм зумовлюється сумою е.р.с. машини й напруги мережі.

У режимі електродинамічного гальмування якірне коло машини відмикається від мережі й замикається на зовнішній резистор, тобто напруга на машині відсутня, а сама машина є генератор, що працює на ізольоване навантаження.

3.5 Статичні характеристики ДПС НЗ в гальмівних режимах

3.5.1 Режим рекуперативного гальмування

Перехід у такий режим буде відбуватися, коли з боку виконавчого механізму на вал двигуна діють у двигуневому режимі моменти, що співпадають за напрямком з моментом, що розвиває двигун. Внаслідок чого швидкість двигуна почне збільшуватись й стане більшою швидкості ідеального неробочого ходу, а е.р.с. двигуна при цьому стане більшою прикладеної до двигуна напруги (напруги мережі). Двигун тут буде працювати у режимі генератора паралельно з мережею, якій він віддає електричну енергію. Струм при цьому змінює свій напрямок на протилежний. Це очевидно із рівняння

$$I_{я} = \frac{U_{м} - E_{я}}{R_{я}} \quad (3.16),$$

де $E_{я} = C_{м} \cdot \Phi \cdot I_{я}$, $|\omega| > |\omega_0|$, $|E_{я}| > |U_{м}|$.

Отже струм змінить знак на протилежний, змінить знак і момент, оскільки

$$M = C_{м} \cdot \Phi \cdot I_{я}.$$

Під дією цього моменту швидкість буде зростати, а електричний стан машини буде змінюватись (дивись таблицю 3.2).

У режимі рекуперативного гальмування двигун створює гальмівний генераторний момент. Електропривод досягає ustalеної швидкості, коли зростаючий момент двигуна не стане рівним рушійному моменту виконавчого механізму.

Таблиця 3.2 – Електричний стан двигуна.

Двигуневий режим	Режим ідеального неробочого ходу	Режим рекуперативного гальмування
$\omega < \omega_0$	$\omega = \omega_0$	$\omega > \omega_0$
$ E_{я} < U_{м} $	$ E_{я} = U_{м} $	$ E_{я} > U_{м} $
$I_{я} > 0$	$I_{я} = 0$	$I_{я} < 0$

У наслідок того, що перехід від двигуневого режиму до гальмівного здійснився без зміни параметрів двигуна і схеми вмикання його у мережу, а тільки за рахунок підведення до вала двигуна додаткового моменту, рівняння механічної характеристики залишається у такому ж вигляді, як і для двигуневого режиму.

Рекуперативному гальмуванню буде відповідати ділянка механічної характеристики, розташованої у другому квадранті (рисунок 3.7), тобто при

$$\omega > \omega_0 \text{ і } M < 0.$$

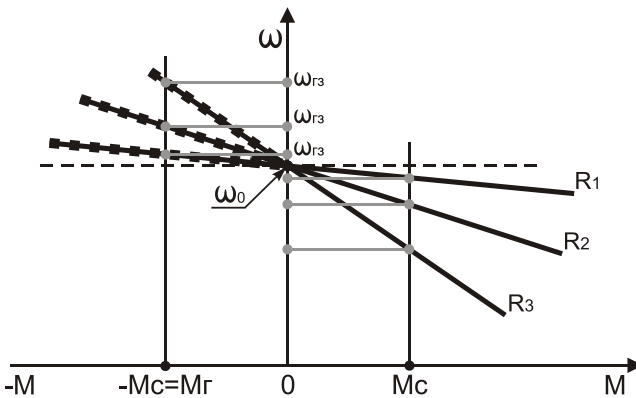


Рисунок 3.7 – Характеристики гальмування.

Як і для двигунового режиму, збільшення опору в колі якоря збільшує крутизну характеристик (зменшує жорсткість), а одній і тій же величині гальмівного моменту M_z буде відповідати збільшення швидкості гальмування ($\omega_{z1} < \omega_{z2} < \omega_{z3} < \dots$) зі зростанням опору (рисунок 3.7).

Отже, графічно механічні характеристики гальмівного режиму є продовження відповідних механічних характеристик двигунового режиму у другий квадрант.

Такий спосіб гальмування можливий у приводах вантажопіднімальних механізмів при опусканні вантажу.

Рекуперативне гальмування є вельми економічним, так як воно супроводжується віддачею електричної енергії у мережу. В цю енергію двигун перетворює механічну енергію на валу, яку він одержує від виконавчого механізму.

Але гальмування цим способом суттєво обмежене, оскільки не у всіх приводах і не у всіх випадках може дотримуватись умова

$$\omega > \omega_0.$$

Чим більше буде опір якорного кола, тим вище буде швидкість гальмування.

3.5.2 Режим гальмування противвімкненням

При цьому режимі двигун обертається за рахунок запасу кінетичної енергії або потенціальних сил виконавчого механізму у бік, протилежний дії моменту, що розвиває двигун, (тобто обмотки двигуна увімкнені на обертання в один бік, але за рахунок накопиченої кінетичної або потенціальної енергії, що діє з боку виконавчого механізму на вал двигуна, він обертається у протилежний бік).

Це може відбуватись у вантажопіднімальному механізмі, коли електродвигун увімкнений на піднімання вантажу, а момент, що створює вантаж, змушує двигун обертатися у бік опускання вантажу. Такий же режим відбувається при перемиканні обмоток електродвигуна при його обертанні на реверс (від початку перемикання до повної зупинки).

Слід розрізняти два випадки реалізації гальмування противімкненням:

- при накопиченні потенціальної енергії (з активним статичним моментом);
- при накопиченні кінетичної енергії (з реактивним статичним моментом).

I випадок. Графічне зображення статичної механічної характеристики, наприклад, для так званого гальмівного спускання, вантажу, має вигляд показаний на рисунку 3.8. Механічна характеристика для режиму гальмування противімкнення є продовження характеристики двигунового режиму у четвертий квадрант.

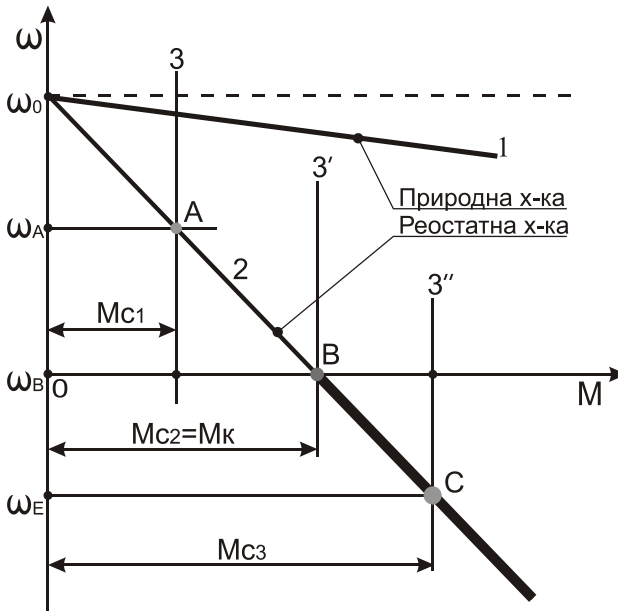


Рисунок 3.8 – Характеристики гальмування з активним M_c .

При вмиканні обмоток двигуна для піднімання вантажу, двигун може бути запущеним у хід лише тоді, коли

$$M_c < M_K = M_{\text{пуск}}, \quad (3.17)$$

де M_c - статичний момент опору вантажу, умова (3.17) буде чинна, наприклад, коли $M_c = M_{c1}$ (точка **A**, рисунок 3.8);

$M_\kappa = M_{\text{пуск}}$ - момент двигуна на початку пуску, ще при нерухомому якорі, тобто момент короткого замкнення (точка **B**).

Якщо момент опору вантажу під час пуску складає M_{c1} , то після запуску двигуна швидкість його буде збільшуватись до значення швидкості ω_A , тобто до усталеної швидкості у точці **A**, а струм двигуна визначається:

$$I_{яA} = \frac{U_M - E_{яA}}{R_я}. \quad (3.18)$$

Якщо під час піднімання вантажу збільшувати масу вантажу (тобто характеристику виконавчого механізму 3 (дивись рисунок) зміщувати вправо), то швидкість двигуна буде спадати по ділянці характеристики AB , швидкість піднімання вантажу буде зменшуватись, якщо збільшити при цьому вантаж до створення моменту опору M_{c2} (характеристика механізму 3'), що буде дорівнювати пусковому моменту

$$M_{c2} = M_{\text{пуск}} = M_\kappa,$$

а двигун зупиниться, швидкість піднімання вантажу $\omega_B = 0$.

Для цієї швидкості рівняння (3.18) буде мати вигляд

$$I_{яB} = \frac{U_M - 0}{R_я} = \frac{U_M}{R_я} = I_\kappa = I_{\text{пуск}}.$$

Таким чином, двигун при цьому буде обертатися у протилежний бік, магнітний потік двигуна зберіг свій напрямок, значить напрямок е.р.с. двигуна зміниться на протилежний, а струм двигуна у відповідності до (3.17) буде

$$I_{яC} = \frac{U_M - (-E_{яC})}{R_я} = \frac{U_M + E_{яC}}{R_я},$$

величина якого, як видно з виразу, буде більшою, ніж у двигуневому режимі.

Відповідно струмові збільшиться й момент ДПС НЗ у гальмівному режимі порівняно з двигуневим.

Таблиця 3.3, що показує три режиму роботи привода (відповідно для трьох точок характеристики A , B і C).

Таблиця 3.3 – Електричний стан двигуна.

Точка А	Точка В	Точка С
$\xrightarrow{U_m}$	$\xrightarrow{U_m}$	$\xrightarrow{U_m}$
$\xleftarrow{E_{яА}}$	$E_{яВ} = 0$	$\xrightarrow{E_{яС}}$
Двигуневий режим	Двигун нерухомий	Режим гальмування противвімкненням

Як видно із таблиці 3.3, при гальмуванні противвімкненням е.р.с. машини спрямована послідовно - узгоджено з напругою мережі, тобто двигун працює у генераторному режимі послідовно з мережею. Вироблена машиною електроенергія й електроенергія, що споживається з мережі марно витрачається у вигляді теплоти на опорах якірного кола, підігріваючи машину й навколишнє середовище.

II Випадок. Значно частіше розповсюджене гальмування противвімкненням за рахунок накопичення механізмом кінетичної енергії (з реактивним статичним моментом) шляхом змінювання полярності живлення якірного кола двигуна при його обертанні на протилежну. При цьому, як і у I-му випадку, е.р.с. спрямована узгоджено з напругою мережі, а момент двигуна спрямований проти обертання якоря.

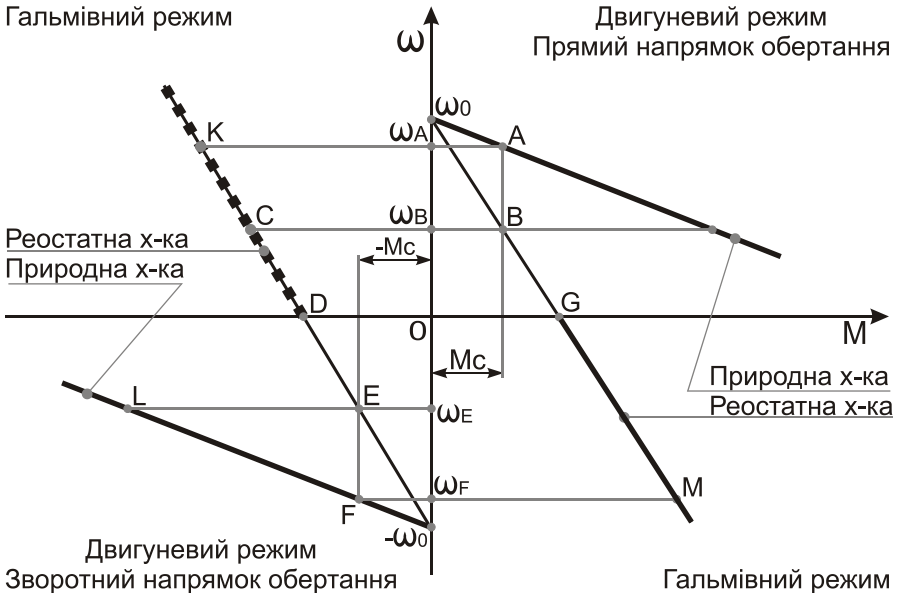


Рисунок 3.9 – Характеристики гальмування з реактивним M_c .

Нехай до змінювання полярності двигун працював на природній характеристиці з заданою швидкістю ω_A при моменті опору M_c у двигуновому режимі заданого напрямку обертання – тобто у I-му квадраті.

Для того, щоб здійснити гальмування протидієння при реактивному статичному моменті опору слід:

а) у коло якоря ввести додатковий опір $R_{яд}$ для зменшення струму, швидкість двигуна уповільниться і він перейде працювати з природної характеристики (точка A) на реостатну характеристику (у точку B);

б) при швидкості двигуна ω_B змінити полярність живлення якірного кола, якщо при цьому не змінювати величину додаткового опору якірного кола $R_{яд}$, то робота двигуна перейде у точку C причому відрізок KE буде паралельним BM ;

в) під впливом гальмівного моменту двигуна буде компенсуватись накопичена кінетична енергія і швидкість буде зменшуватись по реостатній характеристиці до точки D , у якій повністю погаситься накопичена кінетична енергія, швидкість двигуна буде дорівнювати нулю (він повністю зупиниться);

г) на цьому (точка D) процес гальмування завершився, але на якір двигуна продовжує діяти момент двигуна і щоб двигун під дією цього моменту не почав обертатися у протилежний бік, у точці D двигун відмикається від мережі – гальмування здійснено;

д) якщо при цьому не відбулася зміна величини статичного моменту опору M_c , збільшення швидкості обертання двигуна у зворотному напрямку буде здійснюватись до точки E і в подальшому він буде обертатись з усталеною швидкістю ω_E ;

ж) при бажанні перейти на природну характеристику слід вивести додатковий опір якоря $R_{я0}$ - двигун збільшить свою швидкість і перейде працювати у точку F на природній характеристиці з усталеною швидкістю ω_F .

Зауваження. Починати гальмування можна безпосередньо з природної характеристики, для цього:

а) при роботі у двигуновому режимі попереднього (прямого) напрямку обертання на природній характеристиці у точці A з швидкістю ω_A здійснити змінювання полярності напруги живлення якірного кола на протилежну;

б) ввести додатковий опір $R_{я0}$ і двигун при швидкості ω_A перейде на роботу у гальмівний режим (2-й квадрант) у точку K , на відміну від попереднього гальмування (при швидкості ω_B) струм і момент двигуна будуть більшими;

в) під впливом гальмівного моменту двигуна буде компенсуватись накопичена кінетична енергія і швидкість почне зменшуватись по реостатній характеристиці від точки K до точки C ;

г) далі процеси гальмування не будуть відрізнятись від попереднього режиму (початок гальмування зі швидкістю ω_B).

Якщо ще раз змінити полярність напруги живлення якоря, то за попереднім сценарієм, двигун знову перейде у режим гальмування

протипввмкненням по напрямку *FMGBA* і вийде у двигуневий режим роботи прямого напрямку обертання – 1-й квадрант.

Гальмівний режим протипввмкнення, має такі переваги:

- широкий діапазон застосування цього способу гальмування
- ефективне гальмування, бо мають місце значні струми, що дозволяє це гальмування використовувати у аварійних ситуаціях при великих швидкостях – гальмування реверсом по природній механічній характеристиці (при відсутності додаткового опору $R_{яд}$).

Води:

- гальмування протипввмкненням енергетично вкрай невигідне, оскільки гальмування здійснюється споживанням із мережі значного струму;

- великі струм й момент гальмування призводять до значних перегрівів обмоток двигуна, а при аварійному гальмуванні призводить до неминучого руйнування привода.

Таким чином, для обмеження струмів й моментів у режимі гальмування протипввмкненням обов'язкова умова гальмування – введення додаткових резисторів у якірне коло двигуна при гальмуванні.

3.5.3 Режим електродинамічного гальмування

Для спрощення будемо називати скорочено – динамічне гальмування.

У режимі динамічного гальмування двигун використовується як генератор постійного струму незалежного збудження замкненого на незалежне навантаження у вигляді зовнішнього резистора $R_{дг}$ за схемою, рисунок 3.10.

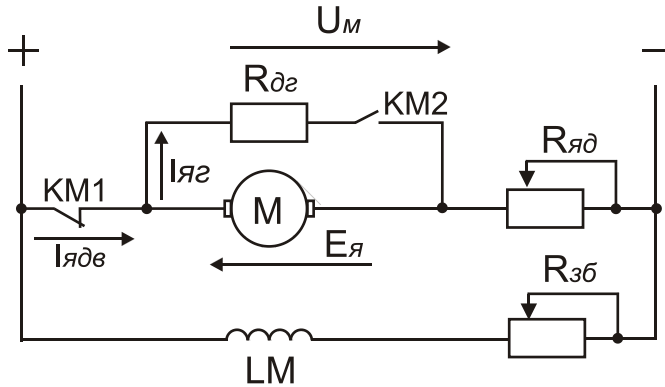


Рисунок 3.10 – Схема для здійснення режиму динамічного гальмування.

$KM1$ – замкнено; $KM2$ – розімкнено – двигуневий режим

$KM1$ – розімкнено; $KM2$ – замкнено – гальмівний режим

$KM1$ - лінійний контактор для вмикання якірного кола двигуна;

$KM2$ - контактор динамічного гальмування;

$I_{ядв}$ - струм якоря у двигуневому режимі двигуна;

$I_{яг}$ - струм якоря у гальмівному режимі двигуна;

$E_я$ - е.р.с. якоря двигуна;

LM - обмотка незалежного збудження двигуна;

$R_{яд}$ - додатковий резистор у якірному колі двигуна в двигуневому режимі;

$R_{зб}$ - додатковий резистор у колі збудження;

$R_{\delta 2}$ - гальмівний резистор.

Тобто динамічне гальмування відбувається, якщо якірне коло відімкнути від мережі і замкнути його на резистор $R_{\delta 2}$. Обмотка збудження LM двигуна залишається увімкненою на живлення і у двигуневому, і у гальмівному режимах. У цьому випадку машина працює генератором за рахунок накопиченої кінетичної енергії в обертальних частинах привода, або за рахунок накопиченої потенціальної енергії вантажу. В обох випадках генерована

електрична енергія витрачається на нагрівання обмоток якоря й гальмівного резистора $R_{\partial z}$.

У наслідок того, що е.р.с. якоря при динамічному гальмуванні зберігає той же знак, що й у двигуновому режимі, а напруга до якоря ззовні не прикладається ($U_m = 0$), то, у відповідності до рівняння (3.16), напрямок струму динамічного гальмування змінюється на протилежний порівняно з двигуновим режимом

$$I_{я} = \frac{U_m - E_{я}}{R_{я}},$$

при $U_m = 0$

$$I_{я\partial} = \frac{0 - E_{я}}{R_{я}} = -\frac{E_{я}}{R_{я}}, \quad (3.19)$$

де $R_{\bar{y}} = R_{y\bar{a}} + R_{\bar{a}\bar{a}}$ - сумарний опір якірного кола при гальмуванні.

За тих же причин ($U_m = 0$) механічна характеристика буде мати інший вид у гальмівному режимі порівняно з двигуновим.

$$\omega = \frac{U_m}{C_m \cdot \Phi} - M_{\partial z} \cdot \frac{R_{я}}{C_m^2 \cdot \Phi^2},$$

при $U_m = 0$

$$\omega = -M_{\bar{a}\bar{a}} \cdot \frac{R_{\bar{y}}}{C_i^2 \cdot \hat{\Phi}^2}, \quad (3.20)$$

де $M_{\bar{A}\bar{A}}$ - гальмівний момент двигуна.

У відповідності до прийнятих раніше припущень рівняння (3.20) математично являє собою лінію вигляду

$$y = k \cdot x,$$

тобто пряму лінію, що проходить через початок координат із 2-го у 4-й квадранти. Жорсткість характеристик залежить від величини опору якірного кола двигуна. Найбільш інтенсивно відбувається гальмування

- струмові навантаження при динамічному гальмуванні більш полегшені ніж при гальмуванні противвімкненням;
- можливість гальмування при відмиканні з якірного кола двигуна, особливо важливо при аварійному гальмуванні.

До вад цього виду гальмування слід віднести наявність спеціальної електричної схеми, яка забезпечує перемикання двигуна з двигуневого режиму роботи на гальмівний.

3.5.4 Використання електричних способів гальмування електроприводів

Електричне гальмування широко використовується в електроприводах, особливо в приводах, які за умов технологічного процесу часто запускаються.

Для забезпечення необхідного часу гальмування й точності позиціонування на практиці краще застосовувати динамічне гальмування, для цієї мети гальмування противвімкнення застосовується рідше.

Для нереверсивних приводів краще застосовувати динамічне, так як при цьому загальна схема привода буде простішою, порівняно зі застосуванням гальмування противвімкнення.

Для реверсивних електроприводів, де гальмування й запуск двигуна у зворотному напрямку являють собою єдиний процес, доцільно використовувати гальмування противвімкненням, яке дає виграш у часі порівняно з динамічним гальмуванням.

Крім окремих випадків гальмування електроприводів транспортних та вантажопіднімальних механізмів рекуперативного гальмування використовується в окремих випадках регулювання швидкості, коли двигун переходячи на більш низькі швидкості має швидкість

$$\omega > \omega_0.$$

Оскільки динамічне гальмування має кращі характеристики порівняно з іншими випадками гальмування, бувають випадки регульовного електропривода використовується тільки динамічне гальмування на усі випадки можливих режимів роботи ЕП (наприклад, у деяких моделях електровозів).

3.6 Статичні механічні характеристики електро- двигунів постійного струму послідовного збудження

Нормальна схема вмикання у мережу двигуна постійного струму послідовного збудження показана на рисунку 3.12.

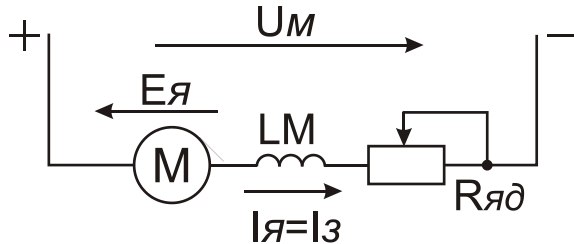


Рисунок 3.12 – Нормальна схема вмикання ДПС ПЗ.

На схемі прийняті такі позначення:

$I_я$ - струм якоря;

$I_з$ - струм збудження;

$R_я$ - додатковий опір у колі якоря.

На відміну від ДПС НЗ тут магнітний потік Φ є функцією струму якоря, оскільки обмотка збудження LM підімкнена послідовно з обмоткою якоря, тобто $I_я = I_з$ отже магнітний потік є і функцією навантаження, бо $I_я = I_{нав}$.

З другого боку залежність магнітного потоку від струму якоря є магнітною характеристикою $\Phi = f(I_я)$ (кривою намагнічування) дивись рисунок 3.13.

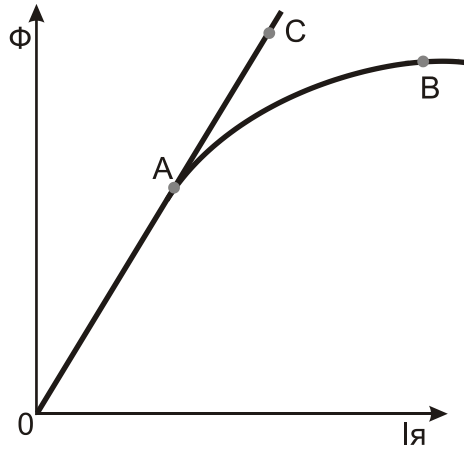


Рисунок 3.13 – Залежність $\Phi = f(I_{я})$.

Оскільки крива намагнічування є нелінійною характеристикою й немає точного її аналітичного виразу, то важко одержати й точний аналітичний вираз для механічної характеристики ДПС ПЗ, на відміну від ДПС НЗ.

Для одержання приблизного аналітичного виразу для механічної характеристики знехтуємо нелінійною залежністю, якою пов'язані між собою струм $I_{я}$ й магнітний потік Φ , (вважати цю залежність лінійною) тобто реальну залежність ОАВ на рисунку 3.13 замінити ідеалізованою залежністю у вигляді прямої ОАС. Це з погляду фізики значить, що сталь двигуна має нескінченну магнітну проникність μ , тобто при будь-якому струмові залишається ненасиченою.

Аналітичний вираз механічної характеристики можна одержати таким чином. При лінійній залежності $\Phi = f(I_{я})$, цю залежність можна записати так: $I_{я} \equiv \Phi$, тобто

$$\Phi = \alpha \cdot I_{я}, \quad (3.21)$$

де α - коефіцієнт пропорційності між Φ і $I_{я}$.

На підставі (3.21) вираз для моменту буде виглядати

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_{я}$$

$$M = c_m \cdot \alpha \cdot I_y \cdot I_y = \alpha \cdot c_m \cdot I_y^2 \quad (3.22)$$

де c_m і α - сталі величини.

У загальному вигляді рівняння електромеханічної характеристики ДПС відоме:

$$\omega = \frac{U_m - I_y \cdot R_y}{c_m \cdot \Phi}. \quad (3.23)$$

Підставивши у рівняння (3.23) значення магнітного потоку з (3.21) одержимо

$$\omega = \frac{U_m - I_y \cdot R_y}{c_m \cdot \Phi} = \frac{U_m}{c_m \cdot \alpha \cdot I_y} - \frac{R_y}{c_m \cdot \alpha}. \quad (3.24)$$

Рівняння (3.24) являє собою залежність $\omega = f(I_y)$, тобто електромеханічну характеристику ДПС ПЗ.

Із рівняння (3.22) значення (для двигунового режиму) струму буде

$$I_y = \sqrt{\frac{M}{\alpha \cdot c_m}} \quad (3.25)$$

Значення струму якоря із (3.25) підставимо у рівняння (3.24), одержимо:

$$\omega = \frac{U_m}{c_m \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{M}{\alpha \cdot c_m}}} - \frac{R_y}{c_m \cdot \alpha} \quad (3.26)$$

Рівняння (3.26) являє собою залежність $\omega = f(M)$, тобто механічну характеристику ДПС ПЗ. Математичне тлумачення цього виразу являє собою криву гіперболічного характеру вигляду

$$y = \frac{A}{x} + B.$$

Таким чином, для ненасиченого ДПС ПЗ механічна характеристика має гіперболічну залежність для якої вісь ординат є асимптотою. Велика крутизна у межах малих значень моменту пояснюється залежністю швидкості не тільки від падіння напруги у якірному колі (як і у ДПС НЗ), а й від зміни магнітного потоку зі зміною струму, особливо при малих значеннях струму.

Рівнянням (3.26) при розрахунках користуватися не слід тому, що реальні механічні характеристики ДПС ПЗ значно різняться від характеристик виражених рівнянням (3.26), побудову механічних характеристик доводиться виконувати графоаналітичними способами, керуючись даними каталогів, де наводяться природні характеристики ДПС ПЗ $\omega = f(I)$ і $M = f(I)$.

Для загальнопромислових й спеціальних серій ДПС ПЗ ці характеристики дійсні для будь-якого двигуна даної серії, тому що вони наведені у відносних одиницях $\omega_* = f(I_*)$ і $M_* = f(I_*)$.

З урахуванням вищенаведеного природна механічна характеристика ДПС ПЗ має вигляд зображений на рисунку 3.14, де:

- характеристика 1, побудована для лінійної залежності $\Phi = f(I_y)$, тобто у відповідності до рівняння (3.26);
- характеристика 2 - реальна природна характеристика, побудована графоаналітичним способом з урахуванням насичення магнітної системи, вона має ділянку 2', де залежність майже лінійна.

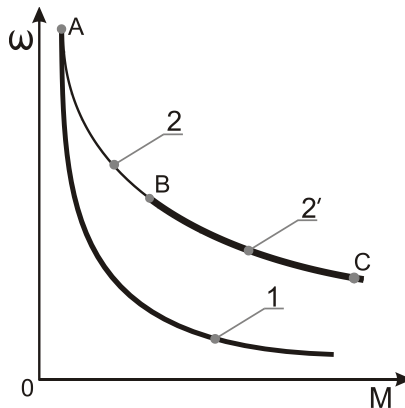


Рисунок 3.14 – Ідеалізована і реальна природні механічні характеристики.

Механічні реостатні характеристики будуються тільки графоаналітичними методами, або графічними методами й мають вигляд зображений на рисунку 3.15.

Зі збільшенням опору якорного кола за рахунок $R_{\partial z}$ жорсткість характеристик подає. Це пояснюється й тим фактом, що зі зростанням

опору якірного кола зростає й падіння напруги у ньому, отже зменшується швидкість.

Із рівняння (3.26) видно, що при прагненні величини моменту до нуля $M \rightarrow 0$ швидкість двигуна прагне до нескінченності $\omega \rightarrow \infty$.

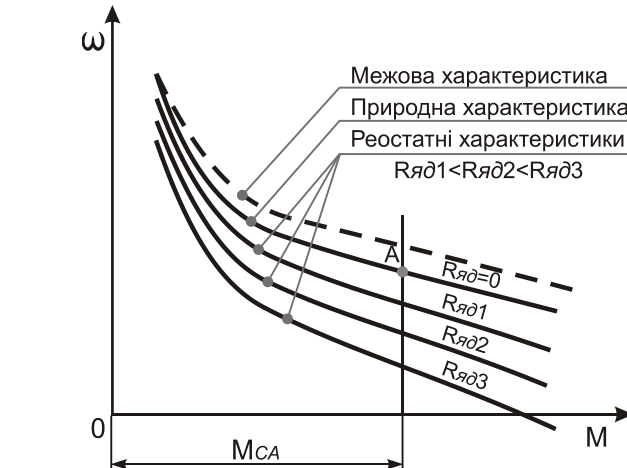


Рисунок 3.15 – Сім'я механічних характеристик.

Насправді необмеженого зростання швидкості при наближенні до ідеального неробочого ходу не відбувається через:

- наявність механічних втрат неробочого ходу (тертя у підшипниках, щітках, об повітря і таке інше);
- наявність залишкового магнітного потоку незалежно від струму якоря.

Однак при неробочому ході швидкість досить висока, сягає $\omega_{\max} = (5-8) \cdot \omega_{\text{ном}}$.

Таке перевищення швидкості в реальних умовах неприпустиме за двох причин:

- межа механічної міцності деталей двигуна, що обертаються, у першу чергу, колектора й бандажів;
- різке погіршення комутації на високих швидкостях із-за зростання $e_{\text{ком}}$ (е.р.с., що наводиться при комутації), що може привести навіть до кругового вогню по колектору.

За цих умов стандарти допускають у реальних ДПС ПЗ перевищення швидкості не більше $\omega_{\max} = (3-3.5) \cdot \omega_{\text{ном}}$.

Це з одного боку, з другого - ДПС ПЗ забороняється експлуатувати в умовах, які допускають режим неробочого ходу з малими втратами. У реальних умовах механічного розносу електричних колекторних машин не трапляється, бо йому буде передувати електричне руйнування - к.з. на вході машини.

Межова характеристика (природна характеристику ідеалізованого – двигуна, що має реальну магнітну систему, але відсутній внутрішній опір якірного кола, тобто $R_{\text{явн}} = 0$; $R_{\text{збвн}} = 0$). Оскільки межова характеристика не залежить від опору якірного кола, вона є універсальною для певної серії електродвигунів.

Як і для інших ДПС, умови реверсу: зміна знаку моменту двигуна $M = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$ на протилежний можливий двома способами:

$$1\text{-й спосіб, } M = c_m \cdot \Phi \cdot (-I_{\text{я}});$$

$$2\text{-й спосіб, } M = c_m \cdot (-\Phi) \cdot I_{\text{я}}.$$

На відміну від ДПС НЗ, у ДПС ПЗ в електричному відношенні обмотка якоря й обмотка збудження між собою схожі. Реверс струму у обмотці збудження недоцільний, оскільки слід уникати перемагнічування машини для збереження залишкового намагнічування. Отже реверс струму для зміни напрямку обертання двигуна необхідно здійснювати в обмотці якоря, наприклад, за схемою, наведеною на рисунку 3.16.

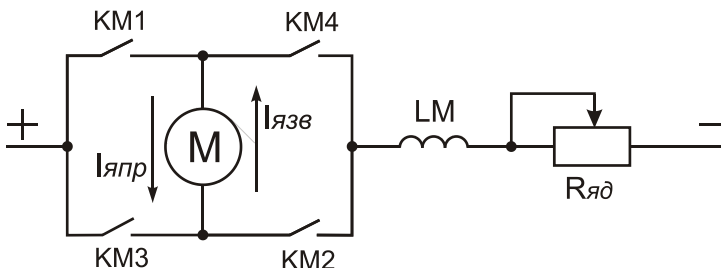


Рисунок 3.16 – Реверс двигуна.

КМ1, КМ2 – увімкнено; КМ3, КМ4 – вимкнено (через якір тече струм $I_{япр}$, наприклад, для прямого напрямку обертання ДПС ПЗ).

КМ1, КМ2 – вимкнено; КМ3, КМ4 – увімкнено (через якір тече струм $I_{язв}$ для зворотного напрямку обертання).

3.7 Статичні характеристики ДПС ПЗ у гальмівних режимах

Рекуперативне гальмування взагалі неможливо реалізувати у ДПС ПЗ.

Е.р.с. ДПС ПЗ не може бути більшою прикладеної напруги мережі. Більше того, вона навіть не може дорівнювати напрузі мережі. Якщо б це було, то двигун мав би кінцеве значення ω_0 (швидкості ідеального неробочого ходу). При наближенні до цього стану різко зростає швидкість двигуна, створюючи можливість аварійної ситуації.

Крім того, при переході електродвигуна у режим рекуперативного гальмування змінюється його струм якоря за напрямком, а для ДПС ПЗ цей струм є ще й струмом збудження, тобто зверсується й напрямом магнітного потоку. Тому, якщо б можливо було б реалізувати рекуперативне гальмування ДПС ПЗ, то необхідно було б мати додатковий пристрій для реверсування напрямку струму збудження.

3.7.1 Режим гальмування противвімкненням

Режим гальмування противвімкненням є основним гальмівним режимом ДПС ПЗ.

При роботі у гальмівному режимі противвімкненням у якірне коло двигуна вмикається додатковий резистор для збільшення опору з метою обмеження струму якоря. Гальмування противвімкненням ДПС ПЗ здійснюється за тих же умов, що й для ДПС НЗ. Маємо також два випадки.

1-й випадок. Якір двигуна під дією зовнішнього моменту обертається в одному напрямку, а обмотки двигуна увімкнені на обертання у зворотному напрямку. Тобто при умові гальмування $M_c > M_\kappa = M_{пуск}$. Механічна характеристика у цьому випадку

(рисунк 3.17) є продовження реостатної характеристики двигунного режиму у 4-й квадрант – у межі від'ємних швидкостей. Двигун вантажопідіймального механізму у двигуневому режимі з усталеною швидкістю піднімає вантаж (точка А) тут усталений режим: момент опору M_{CA} (по характеристиці 3) дорівнює рушійному моменту двигуна M_A (по характеристиці 1). Вводиться резистор у якірне коло, ДПС ПЗ переходить на реостатну характеристику 2 (точка В); тут рівновага порушається – момент опору вантажу залишається незмінним M_{CA} , а рушійний момент M_B зменшиться.

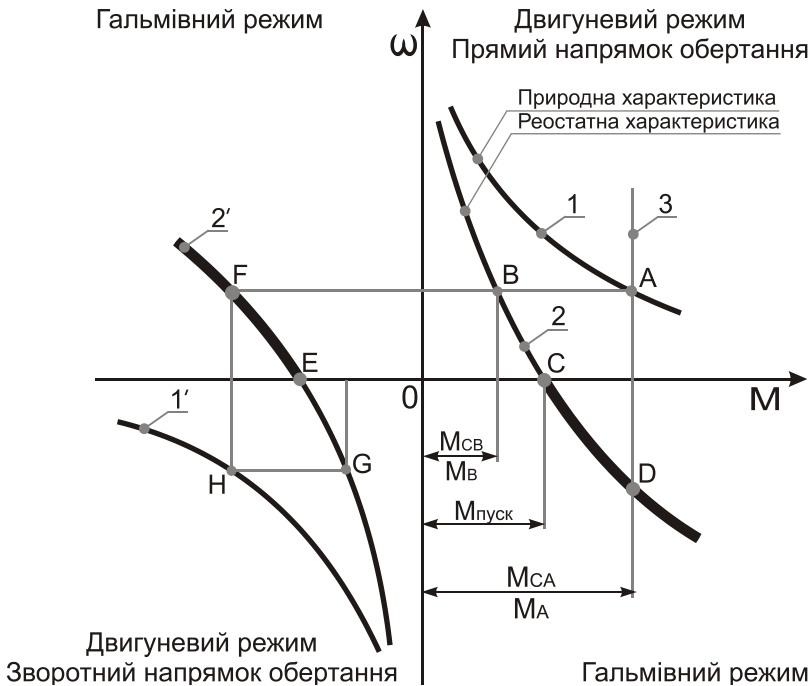


Рисунок 3.17 – Характеристики гальмування.

Під дією надлишку статичного моменту вантажу швидкість піднімання вантажу почне зменшуватись по характеристиці 2 у напрямку від В до С. У точці С швидкість стане рівною нулю

$M = M_{\kappa} = M_{\text{пуск}}$ і при подальшій дії надлишку моменту вантажу двигун почне обертатись у протилежний бік, а вантаж почне опускатися; у точці Д момент рушійний двигуна M_A (по характеристиці 2) буде дорівнювати моменту опору вантажу M_{AC} (по характеристиці 3), тобто буде усталене гальмівне опускання вантажу. Зміна напрямку обертання двигуна обумовлює зміну знака е.р.с. E_y набуває напрямку узгодженого з напрямком напруги живлення (генератор послідовно з'єднаний з мережею) – виконується основна ознака противвімкнення.

2-й випадок. Гальмування за рахунок накопичення механізмом кінетичної енергії (з реактивним статичним моментом) шляхом зміни полярності живлення якірного кола двигуна.

Нехай до зміни полярності двигун працював на природній характеристиці у точці А й долав момент опору вантажу M_{CA} .

Для того, щоб здійснити гальмування слід у коло якоря ввести додатковий опір для обмеження величини струму при противвімкненні – двигун перейде працювати на реостатну характеристику 2 у точку В, залишившись у двигуновому режимі і виконати противвімкнення, а рухома частина двигуна у наслідок дії інерції ще збереже свою кутову швидкість, тобто робота двигуна перейде на точку F. Під впливом дії гальмівного моменту двигуна буде компенсуватись кінетична енергія й швидкість буде зменшуватись по статичній характеристиці 2' від точки F до точки Е.

На цьому процес гальмування завершився, але на якір продовжує діяти момент двигуна, і щоб двигун під дією цього моменту не почав обертатись у протилежному напрямку, у точці Е двигун слід відімкнути від мережі.

Якщо у точці Е двигун не відімкнути від мережі, то він почне обертатись у протилежний бік по реостатній характеристиці (від Е до G і далі).

Такі особливості гальмування двигунів з реактивним статичним моментом (усіх типів взагалі) мають два наслідки:

- якщо мета була загальмувати двигун до повної зупинки, а автоматика не спрацьована, то рух привода у протилежний бік може привести до аварій та нещасних випадків;

- звичайний реверс будь-якого двигуна на ходу електричними методами автоматичного супроводжується гальмівним моментом з реактивним статичним моментом для швидкості первинного напрямку обертання.

3.7.2 Режим електродинамічного гальмування

Режим динамічного гальмування ДПС ПЗ може здійснюватись двома способами:

- гальмування при самозбудженні машини постійного струму (МПС);
- гальмування при незалежному збудженні МПС.

1-й спосіб. Гальмування при самозбудженні розповсюджений більш широко, при цьому якір й обмотка збудження відмикаються від мережі й замикаються на гальмівний резистор $R_{\partial.з.}$ відповідно до схеми, рисунок 3.18.

Тут КМ1 увімкнений, КМ2 вимкнений – двигуневий режим, а КМ1 вимкнений, КМ2 увімкнений – гальмівний.

Цей спосіб гальмування не потребує зовнішнього джерела живлення для його реалізації, що обумовило його широке застосування, особливо у випадках аварійного гальмування, де незалежність від джерела живлення є обов'язковою умовою застосування гальмування.

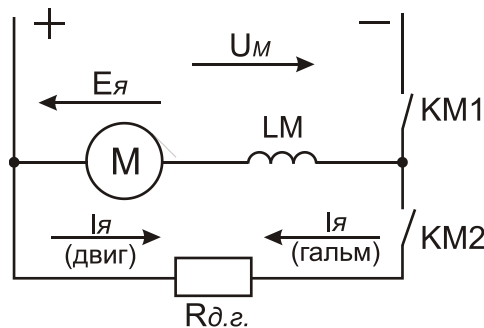


Рисунок 3.18 – Схема гальмування при самозбудженні МПС.

Після відімкнення двигуна від мережі якір його продовжує обертатись за рахунок накопиченої кінетичної або потенціальної

енергії. Для утворення самозбудження потрібно, щоб напрямок струму в обмотці збудження співпав зі струмом в цій же обмотці у режимі роботи двигуна, що передував гальмуванню, якщо при цьому напрямок двигуна не змінювався.

Механічні характеристики динамічного гальмування мають більшу жорсткість при менших значеннях опору.

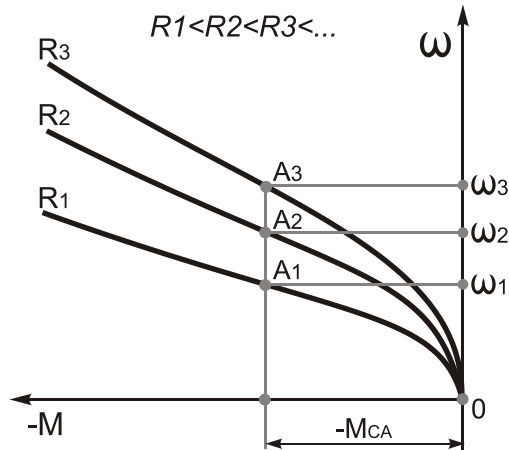


Рисунок 3.19 – Характеристики при самозбудженні МПС.

2-й спосіб. Динамічне гальмування за схемою незалежного збудження застосовується у звичайних умовах. Для здійснення цього гальмування необхідно відімкнути контактором КМ1 якірне коло від мережі, та замкнути обидва контактори КМ2 й КМ3. у результаті чого якірне коло замикається на гальмівний резистор $R_{ядг}$ (контактор КМ2), а обмотка збудження ДПС ПЗ вмикається на напругу мережі (контактором КМ3), причому не прямо, а через додатковий резистор $R_{зд}$.

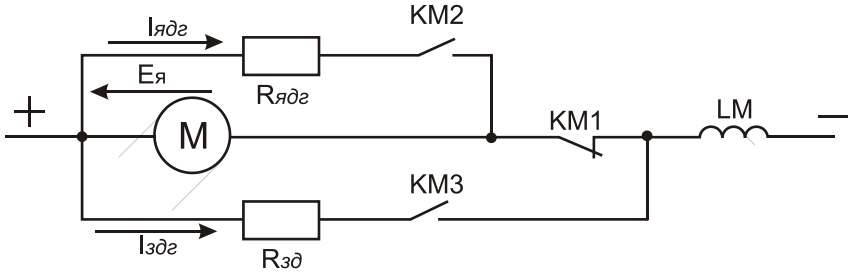


Рисунок 3.20 – Схема гальмування при незалежному збудженні МПС.

Для отримання достатнього гальмівного моменту двигун повинний мати магнітний потік приблизно рівний номінальному, тобто по обмотці збудження повинен протікати номінальний струм. Величину додаткового опору $R_{зд}$ слід підібрати такою щоб струм у колі збудження рівнявся номінальному струму двигуна $I_{здг} = I_{яном}$ (щоб опір $R_{зд}$ приблизно дорівнював внутрішньому опору якоря).

Отже при гальмуванні ДПС ПЗ за схемою незалежного збудження процеси будуть такими ж, як і у ДПС НЗ, але із мережі буде споживатись потужність практично рівна номінальній, тобто гальмування буде при гірших енергетичних показниках, ніж ДПС НЗ.

Характеристики динамічного гальмування ДПС НЗ за схемою незалежного збудження прямолінійні, усі перетинаються в одній точці. Напруга мережі дорівнює нулю, бо вона до якоря не прикладена.

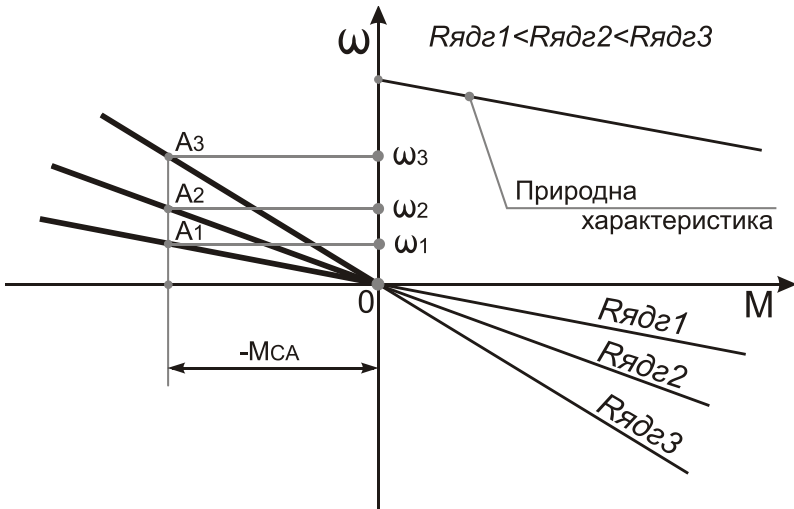


Рисунок 3.21 – Характеристики гальмування при незалежному збудженні МПС.

Жорсткість характеристик залежить, як і раніш, від величини опору в колі якоря $R_{ядг}$. Жорсткість характеристик зменшується зі збільшенням опору $R_{ядг}$, на яке замикається коло якоря при гальмуванні. Якщо $R_{ядг1} = 0$, то характеристика паралельна природній характеристиці двигуна.

3.8 Статичні механічні характеристики асинхронних двигунів

Асинхронні електродвигуни (особливо трифазні) мають саме широке застосування посеред усіх електродвигунів. Це обумовлено простотою конструкції, високою надійністю в експлуатації, порівняно низькою вартістю, кращими масогабаритними показниками. промислової частоти.

Асинхронні двигуни, як і ДПС, мають властивість оборотності, може реалізувати усі три відомі способи електричного гальмування.

Основним методом аналізу усталених статичних режимів роботи АД є використання еквівалентних заступних схем.

3.8.1 Заступна схема АД

З огляду на те, що трифазний АД має електричну й магнітну симетрію фаз, заступні схеми будуються на одну фазу двигуна зі з'єднанням у подальшому фаз обмоток статора і ротора у зірку або трикутник (рисунок 3.31).

Найбільш зручна для аналізу роботи АД є так звана Г-подібна еквівалентна схема з намагнічувальним контуром.

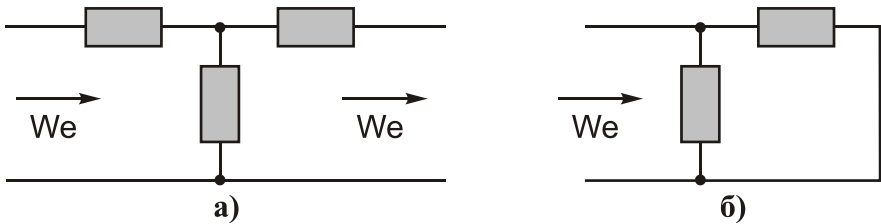


Рисунок 3.31 – Заступні схеми.

Для одержання аналітичного виразу механічної характеристики АД з певним наближенням слід скористатися спрощеною заступною Г-подібною схемою однієї фази АД (рисунок 3.32).

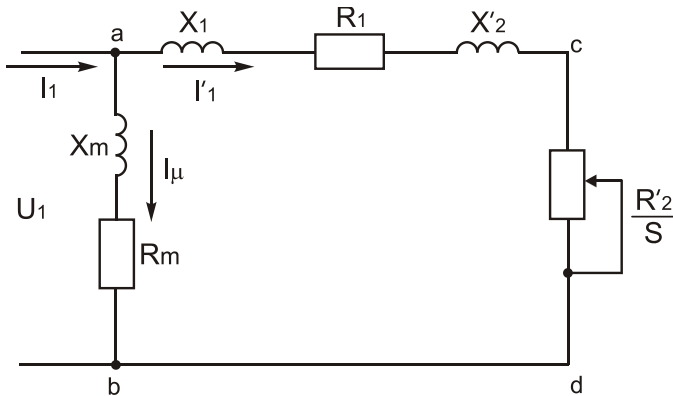


Рисунок 3.32 – Розрахункова Г-подібна заступна схема.

Параметри заступної схеми

$U_1, [B]$ - первинна фазна напруга (живлення фази статора);

$I_1, [A]$ - фазний струм статора;

$I'_2, [A]$ - зведений фазний струм статора;

$X_1, [OM]$ - первинний реактивний опір розсіювання;

$X'_2, [OM]$ - зведений вторинний реактивний опір розсіювання;

$R_1, [OM]$ - первинний активний опір;

$R'_2, [OM]$ - зведений вторинний активний опір;

$I_\mu, [A]$ - струм намагнічування;

$X_m, [OM]$ - реактивний опір контура намагнічування;

$R_m, [OM]$ - активний опір контура намагнічування;

$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, [в.о.]$ - ковзання АД,

де $\omega_0 = \frac{2 \cdot p}{60} \cdot n_0, [1/c]$ - синхронна кутова швидкість двигуна (у системі СИ);

$n_0, [об./хв.]$ - синхронна частота обертання двигуна (у практичній системі одиниць).

Реальна магнітна система, механічна частина та не пов'язані між собою електрично обмотки статора і ротора подаються у вигляді тільки електричного кола:

- магнітна система – намагнічувальний контур схеми (R_m, X_m, I_μ);

- обмотка ротора й статора у схемі з'єднуються між собою електрично, для цього усі параметри однієї із обмоток (наприклад, ротора) зводяться до параметрів другої обмотки (статора);

- механічна енергія двигуна й характер її зміни еквівалентується на електричних втратах енергії на нелінійному опорі схеми R'_2/S .

У цьому випадку досить виконати розрахунки на його заступній схемі, тобто тільки розрахувати електричне коло, користуючись тільки законом Кірхгофа та перенести результати розрахунків на реальний двигун.

3.8.2 Аналітичний вираз механічної статичної характеристики АД

Отже, значення вторинного струму буде

$$I'_2 = \frac{U_1}{Z}$$

де Z – загальний опір обмоток статора й ротора (коло asdb);

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (3.27)$$

Потужність двигуна (для значення ковзання S) дорівнюється

$$P = M \cdot \omega_0 \cdot S \quad (3.28)$$

З другого боку ця потужність є електричні втрати енергії кола схеми asdb:

$$P = (I'_2)^2 \cdot R'_2 \quad (3.29)$$

Це на одну фазу, а на весь двигун ($m = 3$) втрати енергії будуть

$$P = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2 \quad (3.30)$$

Після прирівнювання (3.28) й (3.30)

$$M \cdot \omega_0 \cdot S = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2$$

можна визначити величину моменту АД

$$M = \frac{3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S} \quad (3.31)$$

У рівнянні (3.31) замість вторинного струму I'_2 підставимо його значення із (3.27), одержимо вираз електромагнітного моменту для АД

$$M = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] \cdot S}. \quad (3.32)$$

У рівнянні (3.32), правій його частині усі параметри для даного двигуна й даного статичного режиму є сталими, а незалежною змінною (аргументом) є ковзання S , тому рівняння (3.32) можна подати в узагальненому вигляді (функції)

$$M = f(S). \quad (3.33)$$

Рівняння (3.32) й (3.33) є механічна характеристика АД, виражена через ковзання S . Електромагнітний момент є складною функцією ковзання, крива має два екстремуми – один у двигуновому режимі, другий - у генераторному. Для знаходження цих максимумів достатньо дослідити криву (3.32) на екстремум звичайним способом.

Для цього слід взяти першу похідну від M за ковзанням S й зрівняти її з нулем

$$\frac{dM}{dS} = 0. \quad (3.34)$$

Вирішуючи рівняння (3.32) за умов (3.34), одержимо ковзання ($S_{кр}$), при якому двигун розвиває максимальний момент:

$$S_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (3.35)$$

Підставляючи значення $S_{кр}$ із (3.35) у рівняння (3.32), одержимо вираз максимального моменту

$$M_{\max} = \pm \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}. \quad (3.36)$$

Знак „+” у рівняннях (3.35) й (3.36) відноситься до двигуневому режиму (або гальмівному режиму противвімкненням), а знак „-” – до генераторного режиму рекуперативного гальмування.

$$M = \frac{2M_{\max} \cdot (1 + a \cdot S_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2a \cdot S_{кр}}, \quad (3.37)$$

де $a = R_1 / R'_2$.

Момент АД визначається тільки напругою живлення, хоча вторинний опір, двигуна легко змінювати, уводячи у коло ротора додатковий опір.

Отже, *квадратична залежність моменту АД від напруги живлення спричиняє значну чутливість АД до коливань напруги мережі (зменшення напруги, наприклад, вдвоє призводить до зниження моменту, що розвиває двигун, у чотири рази).*

Величина напруги мереж змінного струму регламентується, забороняється експлуатація, якщо падіння напруги більше 10%.

3.9 Механічна статична характеристика АД у координатах S й M ($M = f(S)$)

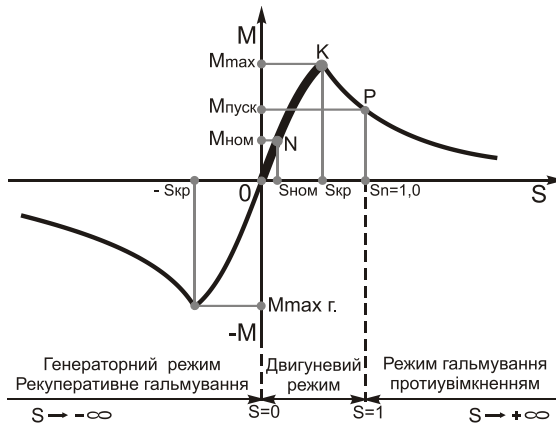


Рисунок 3.33 – Механічна характеристика АД в координатах $M = f(S)$.

Крива має чотири характерні точки

- синхронний режим (точка 0), при цьому $S = 0$, $M = 0$;

- номінальний режим (точка N), при цьому $S = S_{ном}$,

$M = M_{ном}$;

- критичний режим (точка K), при цьому момент, який розвиває двигун у двигуновому режимі, максимальний $M = M_{max \partial}$, а ковзання, що відповідає цьому режимові критичне $S = S_{кр}$;

- режим початкового пуску (точка P), при цьому ковзання $S_n = 1$, а момент – пусковий $M = M_{пуск}$.

На протязі числової осі (числа змінюються від $-\infty$ до $+\infty$) слід відзначити межі зміни ковзання:

а) при $1 > S > 0$ – двигуновий режим;

б) при $+\infty > S > 1$ – режим гальмування противвімкненням;

с) при $0 > S > -\infty$ – генераторний режим рекуперативного гальмування.

Із рівняння (3.36) видно, що максимальний момент для двигунового режиму (за абсолютним значенням) менше, ніж максимального момента генераторного режиму

$$|M_{max \partial}| < |M_{max г.}|$$

(на це впливають знаки „ $\pm$ ” у знаменнику рівняння (3.36)), оскільки опір

$$R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} > R_1 - \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}.$$

Величина критичного ковзання для двигунового й генераторного режимів (за абсолютним значенням) одна і та ж.

$$|S_{кр. \partial}| = |S_{кр. г.}|$$

У реальних умовах активний опір статора (особливо для АД середньої та великої потужностей) не значний і ним (з достатньою для практичних розрахунків точністю) можна знехтувати

$$R_1 = 0. \quad (3.38)$$

З урахуванням (3.38) рівняння механічної характеристики (3.37) набере вигляду

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}. \quad (3.39)$$

Рівняння (3.39) називається спрощеною механічною характеристикою АД у координатах S та M . Однак для двигунів великої потужності (де R_1 дуже мале) це рівняння досить точно відповідає фізичним процесам АД.

Рівняння (3.37) ще називають рівнянням Клосса, а рівняння (3.39) – спрощеною формулою Клосса.

Якщо у рівнянні (3.39) замість поточних значень S та M підставити їх номінальні значення: $S = S_{ном}$; $M = M_{ном}$, а кратність максимального моменту $M_{\max}/M_{ном}$ (перевантажувальну здатність)

позначити λ : $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{ном}}$, то після перетворень рівняння (3.39) буде

мати вигляд:

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (3.40)$$

У рівнянні слід користуватися тільки знаком „+” перед радикалом, оскільки знак „-” відповідає випадку знаходження точок $S_{ном}$ й $M_{ном}$ на механічній характеристиці у зоні, де $S > S_{кр}$. Цей випадок не має практичного значення.

Значення перевантажувальної здатності АД λ має суттєве практичне значення при експлуатації електроприводів. Для трифазних АД загального використання у широкому діапазоні потужностей АД λ має такі межі: $\lambda = 1,7 \div 2,2$, причому більше значення λ відноситься до синхронної частоти обертання АД 3000 об/хв , а менше – для 750 об/хв .

Для спеціальних серій АД перевантажувальна здатність більш висока. Так для кранових та металургійних АД вона складає $\lambda = 2,3 \div 2,8$.

3.10 Аналіз механічної характеристики АД $M = f(S)$, поданої у вигляді спрощеної формули Клосса

Цю характеристику (рисунок 3.34) можна розділити на дві ділянки.

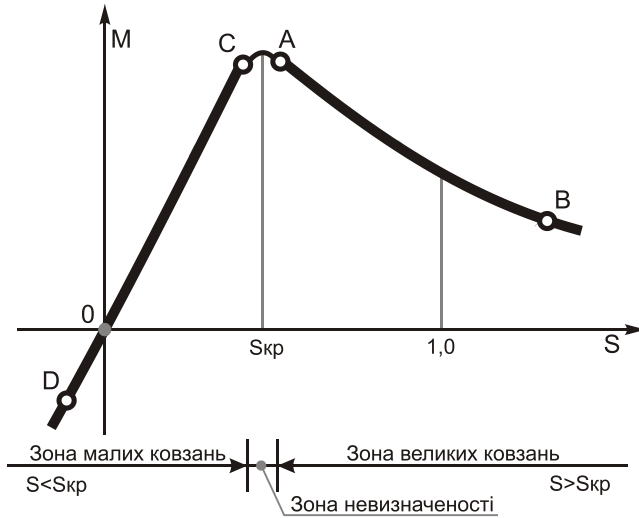


Рисунок 3.34 – До аналізу механічної характеристики АД у координатах $M = f(S)$.

1-а ділянка. При великих значеннях ковзання $S > S_{kp}$ можна знехтувати другим членом знаменника формули (3.39) $\frac{S_{kp}}{S} \rightarrow 0$, тоді формула (3.39) перетвориться у такий вигляд

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_{kp}}}; \quad M = 2M_{\max} \cdot \frac{S_{kp}}{S}; \quad M = \frac{A}{S}, \quad (3.41)$$

де $A = 2M_{\max} \cdot S_{kp}$ - стала величина.

Рівняння (3.41) у вигляді $M = \frac{A}{S}$ з погляду математики тлумачиться рівнянням гіперболи ($y = 1/x$).

Таким чином ділянка характеристики $\overline{AB}$, тобто великих значень ковзання $S > S_{кр}$, являє собою гіперболічну залежність моменту від ковзання як видно ця ділянка поширюється на двигуневий режим неробочої частини та на увесь режим гальмування противітків.

2-га ділянка. При малих значеннях ковзання $S < S_{кр}$ можна знехтувати першим членом знаменника формули Клосса (3.39) $\frac{S}{S_{кр}} \rightarrow 0$, тоді формула (3.39) перетвориться у такий вигляд:

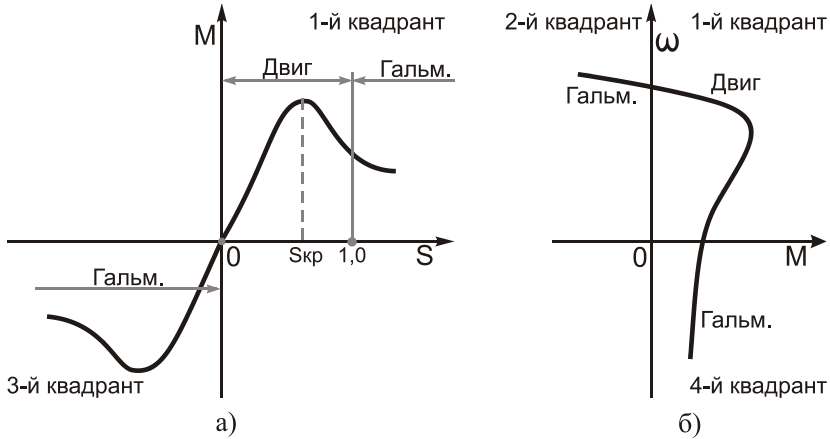
$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S_{кр}}{S}}; M = 2M_{\max} \cdot \frac{S}{S_{кр}}; M = B \cdot S, \quad (3.42)$$

де $B = \frac{2M_{\max}}{S_{кр}}$ - стала величина.

Таким чином ділянка характеристики DC, тобто малих значень ковзання $S < S_{кр}$ являє собою прямолінійну залежність моменту АД M від ковзання S .

3.11 Механічна характеристика АД у координатах ω та M (залежність $\omega = f(M)$)

Якщо механічну характеристику подавати у координатах $M = f(S)$, фрагмент а рисунка 3.35, то в одному й тому ж квадранті можуть подаватися два різних режими роботи АД, наприклад у 1-му квадранті є і двигуневий режим і гальмівний режими. Це вкрай незручно при аналізі режимів роботи електроприводів спільно з виконавчим механізмом.



а – залежність $M = f(S)$;

б – залежність $\omega = f(M)$.

Рисунок 3.35 – Способи подання механічної характеристики АД.

Для створення зручності аналізу механічних характеристик електроприводів, у теорії електропривода використовується механічна характеристика у координатах ω та M , тобто $\omega = f(M)$, фрагмент б рисунка 3.35, замість характеристики $M = f(S)$.

Перейти від однієї характеристики до іншої надзвичайно просто, оскільки ковзання S само-собою є відносна швидкість:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \text{ вирішуючи це рівняння відносно поточної кутової}$$

швидкості ω дає

$$\omega = \omega_0(1 - S). \quad (3.43)$$

З урахуванням (3.43) характеристику $M = f(S)$ легко перетворити у характеристику $\omega = f(M)$.



Рисунок 3.36 – До аналізу механічної характеристики АД в координатах $\omega = f(M)$.

Характеристика $\omega = f(M)$ має ті ж самі ділянки, що й характеристика $M = f(S)$, ділянка $\overline{AB}$ - гіперболічна; ділянка $\overline{DC}$ - прямолінійна, й ті ж самі характерні точки, що й $M = f(S)$:

- синхронний режим (точка ω_0) з координатами $\omega = \omega_0$; $M = 0$;
- номінальний режим (точка N) з координатами $\omega = \omega_{ном}$; $M = M_{ном}$;
- критичний режим (точка K) з координатами $\omega = \omega_{кр}$; $M = M_{мах}$;
- режим початкового пуску (точка P) з координатами $\omega = 0$; $M = M_{пуск}$.

Із графіків $M = f(S)$ та $\omega = f(M)$ видно, що точка K , що відповідає критичному режимові, є водорозділ гіперболічної та

прямолінійної ділянок характеристик, а відрізок кривих $\overline{CA}$ на обох графіках є невизначеною ділянкою механічної характеристики і не може описуватися рівнянням (3.39) – бо тут у межах $S = S_{кр}$ рівняння (3.39) втрачає свою фізичну й математичну суть й перетворюється у тотожність $M = M_{\max}$

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

3.12 Узагальнення властивостей механічних характеристик АД

Властивості механічних характеристик АД:

а) поточне значення моменту АД залежить від квадрата напруги живлення, активного та індуктивного опору обмоток ротора й статора при заданих ковзанні та синхронній кутовій швидкості (дивись рівняння (3.33));

б) момент, що розвиває двигун є складною функцією ковзання, крива має два екстремуму, ковзання що відповідають цим екстремумам називають критичними (рівняння (3.35) й (3.36));

в) величина критичного ковзання залежить від величини активного опору кола ротора (дивись рівняння (3.35));

г) величина максимального моменту АД не залежить від величини активного опору кола ротора (дивись рівняння (3.36));

д) до складу спрощеної формули Клосса входять тільки паспортні данні $S_{кр}$, $M_{\max} = \lambda \cdot M_{ном}$ (дивись рівняння (3.39));

е) робоча ділянка механічної характеристики АД прямолінійна, що суттєво спрощує розгляд процесів, що протікають;

ж) механічна характеристика АД у вигляді $\omega = f(M)$, описуючи конкретний режим АД, забезпечує розташування його у графічному вигляді повністю в одному квадранті системи координат.

Властивості АД ($S_{кр}$ залежить від R'_2 , а $M_{\max}$ не залежить від R'_2) використовується в АД з фазним ротором, рисунок 3.38.

При додатковому опорі $R_{2\partial 4}$ $M_{\text{пуск}} = M_{\text{max}}$. Характеристика 1 є природною характеристикою, а інші характеристики – реостатними.

У двигунах з короткозамкненим ротором явище витіснення струму суттєве, тому параметри обмотки ротора R_2 та X_2 не можуть бути сталими, отже не сталі й механічні характеристики.

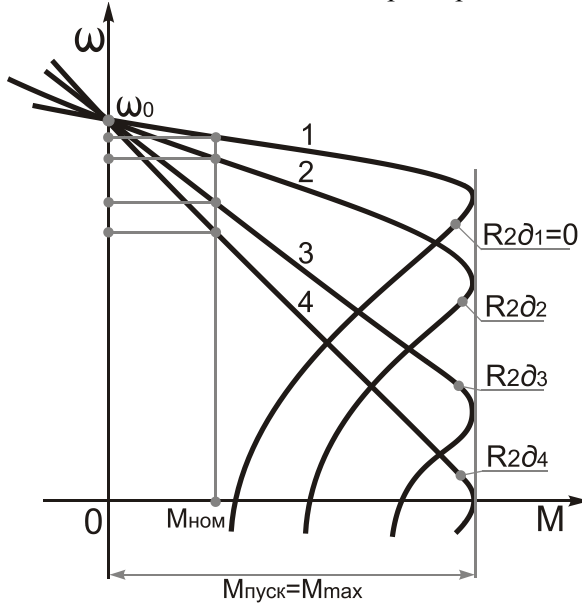


Рисунок 3.37 – Природна й реостатні характеристики АД з фазним ротором.

Крім того у АД з короткозамкненим ротором нема можливості підняти на період пуску в роторне коло пускового реостату, тому його пускові властивості гірші ніж у АД з фазним ротором.

Так кратність пускового моменту K_M складає

$$K_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 1,0 - 1,8, \text{ а кратність пускового струму статора } K_I$$

$$\text{складає } K_I = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} = 5,0 - 7,0.$$

На механічні характеристики суттєво впливають аномальні симетричні режими, такі як зменшення величини напруги живлення статора та збільшення активного й індуктивного опорів у колі статора.

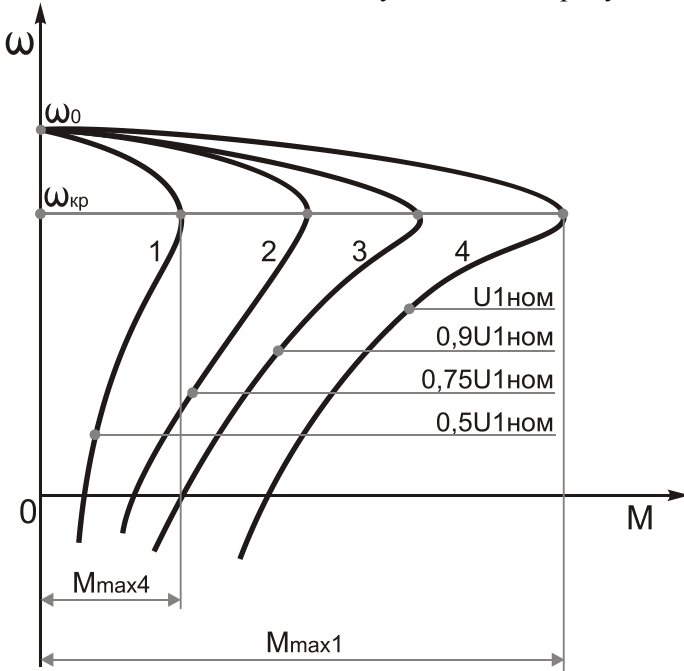


Рисунок 3.38 – Природна й штучні механічні характеристики АД.

Характеристики 1, 2, 3 є штучні характеристика 4 - природна. Для усіх значень напруги критична швидкість $\omega_{кр}$ не залежать від величини напруги. Величина моменту змінюється суттєво зі зміною напруги, так $M_{max1} = 4 \cdot M_{max4}$. У реальних умовах слід постійно контролювати наскільки істотним є зменшення максимального й пускового моментів приводів при зменшенні напруги й наскільки вони задовольняють умовам технологічного процесу.

При застосуванні активного опору трохи збільшується $\cos \varphi_{пуск}$, але трохи збільшуються втрати, порівняно з застосуванням реактивного опору.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
2. Бондаренко В.І. Основы электропривода: Навчальний посібник / В.І.Бондаренко, Ю.О.Крисан. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 402 с.
3. Чиликин М.Г. Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576с.
4. Афонин А.А., Бондаренко В.И. и др. Литейный электромагнитный двигатель в режиме автокоммутации. – Техническая электродинамика, 1987, №2 с. 65-72.
5. Бондаренко В.І. Основы электричного привода: Навчальний посібник / В.І.Бондаренко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – 312 с.
6. А.С. 1580518 (СССР). Способ управления разгоном многофазного шагового двигателя / Писанко В.В., Бондаренко В.И. и др. Опубл. в Б.И., 1990, №27.