

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 2

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни “ЕП і СК ПТБДМ” для студентів спеціальності 136 “Металургія” усіх форм навчання частина 2 /Укл.: Ю.О. Крисан, Є.В. Васильєва. - Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2019. - 68 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

3.13 Механічні характеристики АД у гальмівних режимах	83
3.13.1 Рекуперативне гальмування (з віддачею енергії у мережу).	83
3.13.2 Гальмування противвімкненням	86
3.13.3 Динамічне гальмування	89
3.13.3.1 Динамічне гальмування при незалежному збудженні	89
3.13.3.2 Динамічне гальмування при самозбудженні	94
4 Регулювання координат електроприводів	97
4.1 Основні показники регулювання швидкості електропривода ..	97
4.2 Способи регулювання швидкості	99
4.3 Основні способи регулювання швидкості ДПС НЗ	100
4.3.1 Регулювання кутової швидкості за допомогою додаткових резисторів у колі якоря	100
4.3.2 Регулювання швидкості ДПС НЗ змінюванням величини магнітного потоку	103
4.3.3 Регулювання швидкості ДПС НЗ шунтуванням якоря	108
4.3.4 Регулювання швидкості ДПС НЗ змінюванням напруги живлення якоря	110
4.4 Основні способи регулювання швидкості двигунів послідовного збудження (ДПС ПЗ)	118
4.4.1 Регулювання швидкості ДПС ПЗ за допомогою резисторів у якірному колі	118
4.4.2 Регулювання швидкості ДПС ПЗ змінюванням магнітного потоку	120
4.4.3 Регулювання швидкості ДПС ПЗ змінюванням напруги живлення	121
4.5 Регулювання координат АД	124
4.5.1 Регулювання швидкості АД за допомогою резисторів у колі ротора	125
4.5.2 Регулювання швидкості за допомогою резисторів у колі статора	126
4.5.3 Регулювання швидкості АД змінюванням числа пар полюсів	128
4.5.4 Регулювання координат АД змінюванням напруги живлення статора	135
4.5.5 Частотне регулювання	137
Перелік посилань	147

3.13 Механічні характеристики АД у гальмівних режимах

АД можуть працювати у тих же режимах, що й ДПС:

- рекуперативне гальмування;
- гальмування противвімкненням;
- динамічне гальмування.

Принципово усі ці режими можуть бути застосовані як до АД з короткозамкненим ротором, так й до АД з фазним ротором.

3.13.1 Рекуперативне гальмування (з віддачею енергії у мережу)

Його можливо реалізувати при швидкості, що перевищує синхронну: $\omega > \omega_0$ й при від'ємному ковзанні ($S < 0$).

У двигуновому режимі обертове магнітне поле перетинає провідники обмоток статора й ротора в одному напрямку й тому е.р.с. статора й ротора співпадають за фазою.

У генераторному режимі провідники обмотки статора перетинаються обертовим магнітним полем у попередньому напрямку, а провідники ротора – протилежному. Отже, е.р.с. статора свого знака не змінює, а е.р.с. ротора змінює свій знак на протилежний. Активна складова струму ротора змінює свій знак на протилежний. Реактивна складова свого знака не змінює, оскільки машина і у двигуновому, і у генераторному режимах споживає реактивний струм із мережі для створення й проведення по магнітопроводу машини обертового магнітного поля.

Механічні характеристики АД у гальмівному режимі з віддачею енергії у мережу зображені на рисунку 3.40.

Оскільки ротор у двигуновому режимі в своєму обертанні відставав від обертового поля (позитивне ковзання), при частоті обертання його з частотою обертання поля ω_0 ($S = 0$) є синхронний режим, то у режимі рекуперативного гальмування ротор у своєму обертанні випереджує обертове поле, значить ковзання буде від'ємним й знаходиться у межах $0 > S > -\infty$.

Це при активному статичному моменті опору (за рахунок потенціальної енергії). Рекуперативне гальмування можливе й при реактивному статичному моменті опору (за рахунок накопиченої кінетичної енергії).

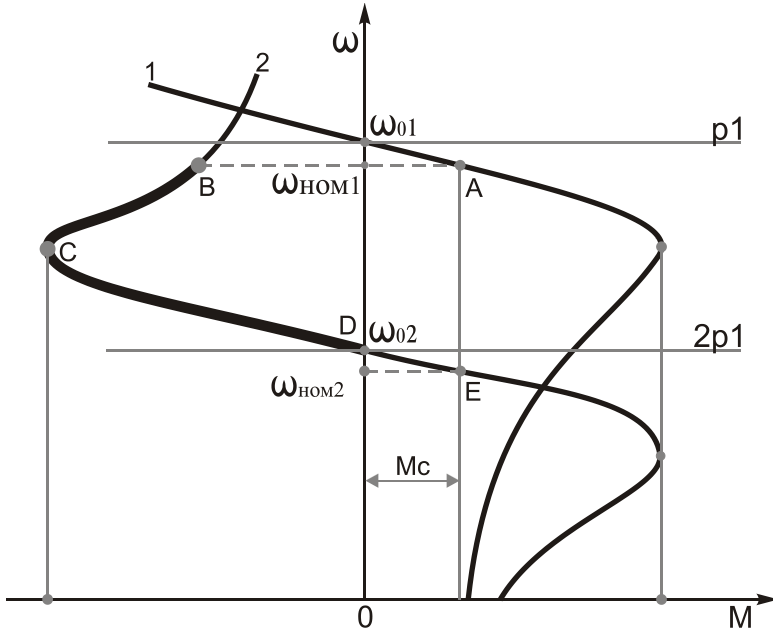


Рисунок 3.41 – Характеристики рекуперативного гальмування при роботі двошвидкісного АД.

При наявності на валу АД реактивного статичного моменту рекуперативне гальмування можливе при деяких випадках регулювання швидкості, коли АД, переходячи до нижчих швидкостей від вищих, проходить точку синхронного режиму. Ділянка характеристики BCD відповідає режиму рекуперативного гальмування двошвидкісного АД. ω_{01} - синхронна швидкість вищого ступеня швидкості (з меншим числом пар полюсів p_1), ω_{02} - синхронна швидкість нижчого ступеня швидкості (з більшим числом пар полюсів $2p_1$). При полюсності обмотки статора p_1 , якщо двигун працює з

моментом опору M_c робоча точка двигуна буде А. Якщо при роботі АД у точці А обмотку статора перемикнути на полюсність $2p_1$ синхронна швидкість стрибкоподібно зменшиться з ω_{01} до ω_{02} , а ротор за рахунок накопиченої кінетичної енергії в перший момент буде продовжувати обертатись з попередньою швидкістю $\omega_{ном1}$, складається ситуація $\omega_{ном1} > \omega_{02}$, АД перейде на роботу в точку В й швидкість його буде зменшуватись за рахунок гальмівного моменту. До міри зменшення кінетичної енергії буде зменшуватись і гальмівний момент (до синхронної швидкості ω_{02} - точка D). Оскільки у цій точці АД моменту не розвиває, то за рахунок моменту опору M_c швидкість АД буде зменшуватись і у двигуновому режимі до точки Е – усталеного режиму роботи АД з навантаженням M_c з новою (меншою) швидкістю.

3.13.2 Гальмування противімкненням

Цей вид гальмування значно ширше застосовується на практиці. Можна одержати при рушійному моменті навантаження (активний M_c) більшому ніж пусковий момент

$$M_c > M_{пуск}.$$

Як відомо пусковий струм АД складає $I_{пуск} = (5-7) \cdot I_{ном}$, тобто при $S=1,0$ (у перший момент пуску) струм значний, а при $S > 1,0$ він іще більший, а момент, навпаки, зменшиться у наслідок великого значення індуктивного опору (індуктивний опір зростає за рахунок значної величини частоти струму ротора при пуску)

$$f_{статора} = f_{ротора}.$$

Для збільшення моменту і для зменшення струму (якщо АД з фазним ротором) у коло ротора слід увімкнути значний активний опір.

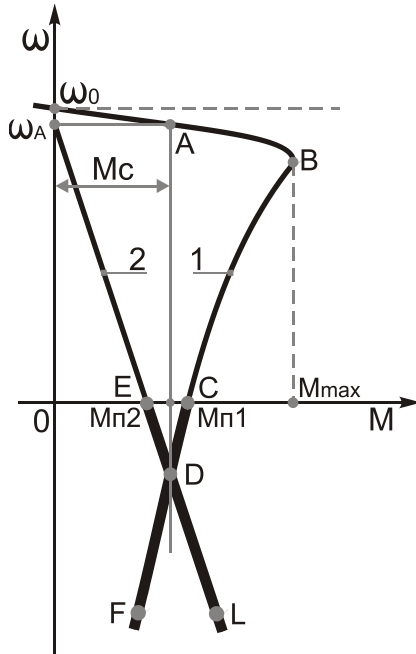


Рисунок 3.42 – Характеристики гальмування протипротивімкнення з активним M_c .

Якщо АД у двигуновому режимі працює на цій характеристиці у точці А з моментом опору M_c і у коло ротора (АД з фазним ротором) при цьому увімкнути значний активний опір (характеристика 2), то швидкість АД почне зменшуватись й починаючи з точки Е двигун перейде у режим протипротивімкнення (ділянка характеристики EDL), а при збільшенні ковзання S (модуля швидкості) гальмівний момент, як видно не зменшується, а навпаки зростає. Усталений режим настане у точці D.

Режим протипротивімкнення можна одержати й при реактивному статичному моменті опору шляхом реверсування АД на ходу, що призведе до зміни напрямку обертання поля миттєво, а ротор за рахунок реактивного статичного моменту буде продовжувати обертатися у попередньому напрямку.

Якщо АД у двигуновому режимі працює на природній характеристиці 1 з моментом опору M_c з усталеною швидкістю $\omega_{ном}$ у точці А для реалізації гальмування противвімкнення слід: на ходу поміняти місцями дві фази статора та ввести додатковий активний опір у роторне коло – робота двигуна з точки А перейде у точку В, або ввести додатковий опір, робота двигуна перейде у точку F й на ходу поміняти місцями дві фази статора – робота двигуна з точки F перейде у точку К.

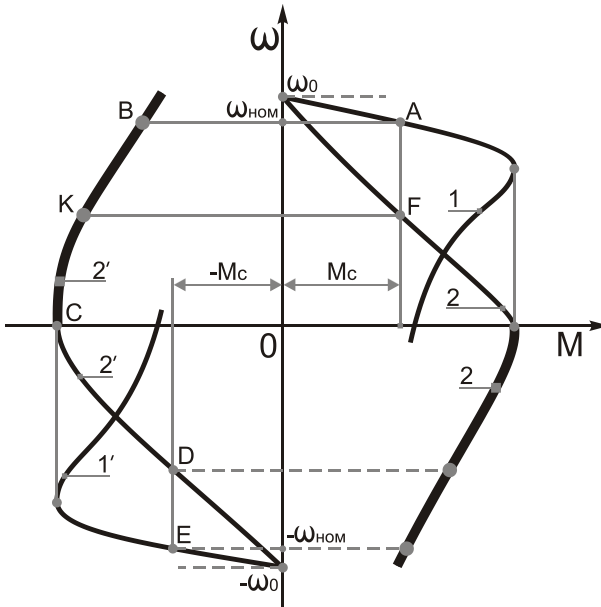


Рисунок 3.43 – Характеристики гальмування противвімкненням з реактивним M_c .

При перемиканні місцями двох фаз статора магнітне поле змінить напрямок обертання на протилежне миттєво, а ротор під дією моменту опору за рахунок накопиченої кінетичної енергії буде обертатися у попередньому напрямку – точка В або К. Під дією гальмівного моменту швидкість буде зменшуватись (ділянка ВКС характеристики 2'). У точці С, коли швидкість ротора дорівнює нулю, АД слід відімкнути від мережі, у супротивному випадку АД перейде у

двигуневий режим зворотного напрямку (ділянка CD) – самодовільний реверс виконавчого механізму, що може привести до аварії або нещасного випадку.

3.13.3 Динамічне гальмування

Динамічне гальмування АД може здійснюватись двома способами:

- динамічне гальмування при незалежному збудженні;
- динамічне гальмування при самозбудженні.

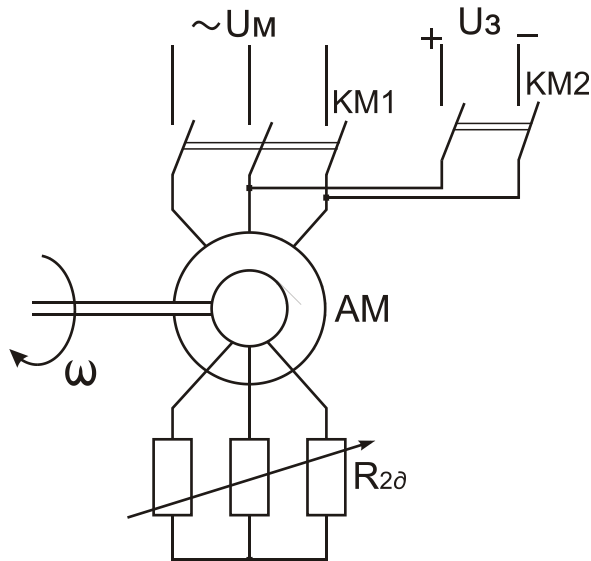
3.13.3.1 Динамічне гальмування при незалежному збудженні

Якщо динамічне гальмування АД здійснювати за класичною схемою, то при відмиканні АД від мережі й замиканні кола статора, двигун буде розвивати дуже малий гальмівний момент.

Для створення належного гальмівного моменту слід створити при цьому магнітний потік, подавши у коло статора, на період гальмування, постійний струм, тобто штучно створити на час гальмування незалежне збудження.

Якщо при цьому АД буде не короткозамкнений, а фазний, то у коло ротора вмикається додатковий активний опір $R_{2\phi}$, при регулюванні якого можна обмежувати струм ротора й змінювати параметри гальмування.

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

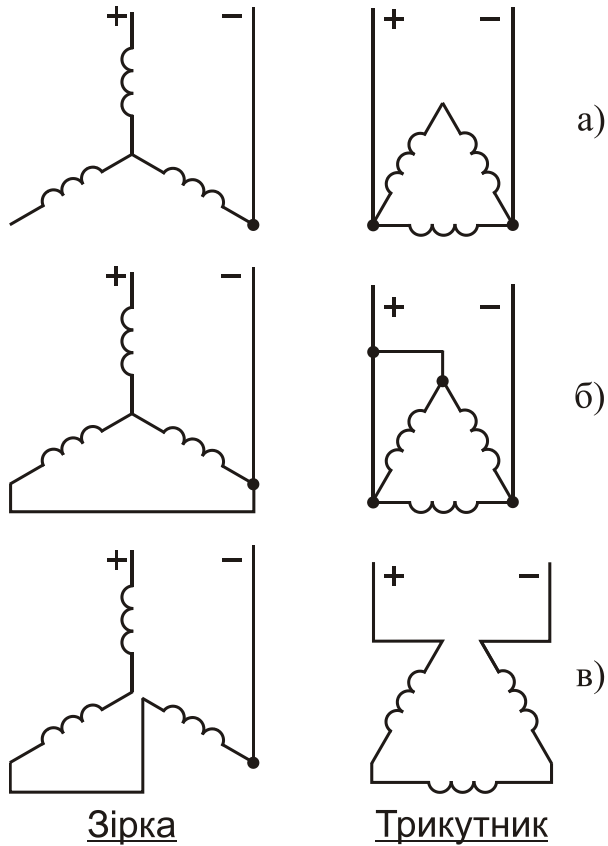


$KM1$ замкнений, $KM2$ розімкнений – двигуневий режим АД;

$KM1$ розімкнений, $KM2$ замкнений – режим динамічного гальмування АД.

Рисунок 3.44 – Схема динамічного гальмування при незалежному збудженні.

Вмикання обмотки статора на постійний струм є несиметричним. Симетричного увімкнення на постійну напругу обмотки статора не можливо здійснити без перемикання фазних обмоток статора. Ці обмотки вмикаються наступним чином (дивись фрагменти **а**, **б** і **в** рисунка 3.45).



а – несиметрична схема,
 б – напівсиметрична схема,
 в – симетрична схема.

Рисунок 3.45 – Вмикання обмотки статора АД на постійну напругу.

Недолік схеми **а** – навантаження окремих фаз нерівномірне. Схема **б** має більшу кількість контакторів, але навантаження більш рівномірне.

Рівномірним симетричним навантаженням буде за схемою **в**, але вона потребує найбільшу кількість контакторів. У реальних умовах найчастіше вживається схема **а** із-за її простоти.

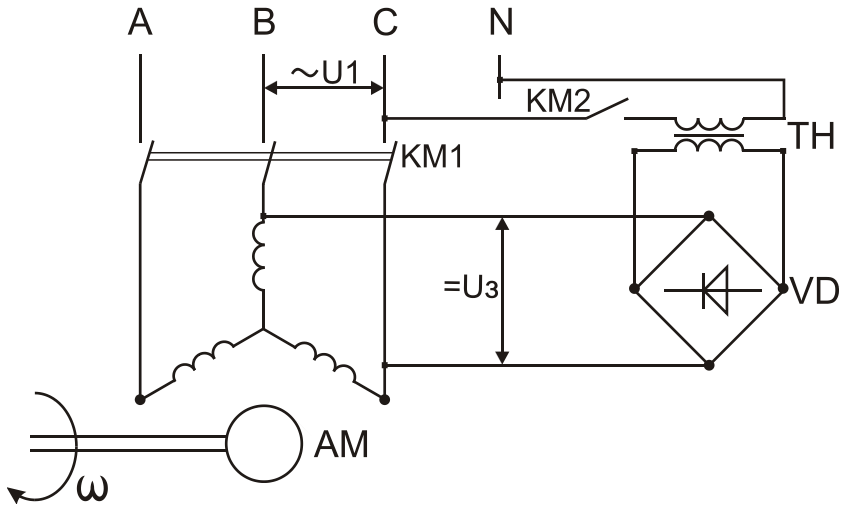


Рисунок 3.46 – Схема живлення обмотки статора АД при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням.

Постійний струм, що протікає по обмоткам статора, створює нерухомий у просторі магнітний потік у якому обертається ротор за рахунок накопиченої потенціальної або кінетичної енергії механізму. При цьому в роторі індуктується е.р.с.. Цей струм створює власне нерухоме у просторі магнітне поле.

У результаті взаємодії струму ротора з вислідним нерухомим магнітним полем створюється гальмівний момент. Величина цього моменту залежить від трьох основних факторів:

- м.р.с. статора (струм збудження);
- величини активного опору в колі ротора;
- швидкості ротора.

Механічні характеристики цього режиму за формою нагадують механічні характеристики двигунового режиму

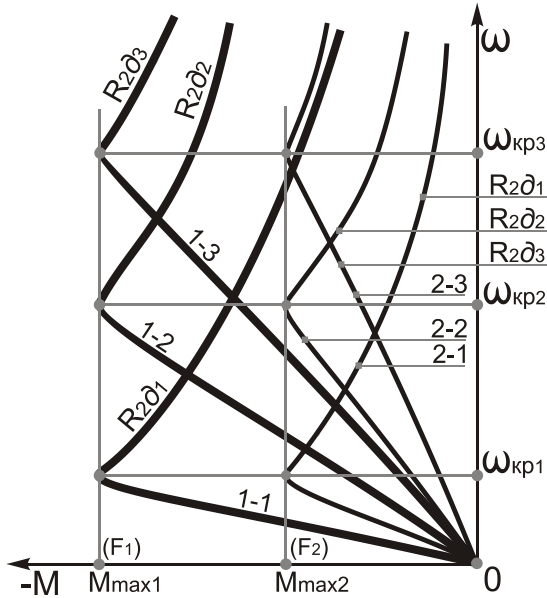


Рисунок 3.47 – Механічні характеристики динамічного гальмування при незалежному збудженні.

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

Характеристики зображені для двох значень м.р.с. статора F_1 та F_2 й для трьох значень активного опору в колі ротора [відповідно для $R_{2\delta 1}(\omega_{кр1})$; $R_{2\delta 2}(\omega_{кр2})$ й $R_{2\delta 3}(\omega_{кр3})$].

Величина максимального моменту гальмування $M_{\max}$ не залежить від величини опору якірного кола, а залежить від величини м.р.с. статора ($M_{\max 1}$ для F_1 і $M_{\max 2}$ для F_2).

Величина критичної швидкості (критичного ковзання), навпаки, однакові для одного й того ж значення активного опору ротора не залежно від величини м.р.с. статора.

При одному й тому ж активному опорі ротора критичне ковзання у двигуновому режимі значно більше критичного ковзання динамічного гальмування, оскільки у режимі динамічного змінний

струм обмотки статора відсутній, значить відсутнє й індуктивний опір X_1 а є тільки індуктивний опір намагнічування X_μ , який $X_\mu \gg X_1$.

Тоді

$$S_{кр(двиг.)} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}, \text{ а}$$

$$S_{кр(дин.гальм.)} = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2}, S_{кр(двиг.)} > S_{кр(дин.гальм.)}.$$

Друга відмінність: у двигуновому режимі вислідна м.р.с. АД оберտальна, а в гальмівному – м.р.с. нерухома.

Третя відмінність: струм статора у двигуновому режимі змінний, а при динамічному струм статора постійний.

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

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

3.13.3.2 Динамічне гальмування при самозбудженні

Це гальмування реалізується просто – до кола статора підмикається конденсатор. Використовується таке гальмування головним чином для АД з короткозамкненим ротором. Для реалізації конденсаторного гальмування у відповідності до схеми досить вимкнути лінійний контактор КМ. Машина працює самозбудженням асинхронним генератором. Поштовх для самозбудження дає е.р.с. яка індуктується в обмотках статора за рахунок обертання ротора. Незначна е.р.с. залишкових процесів, прикладена до конденсатора, обумовлює незначний струм статорного кола. Цей струм створює незначне оберտальне магнітне поле, яке збільшує е.р.с. статора, збільшується напруга на конденсаторі, збільшується струм, збільшується гальмівний момент. Цей процес нарощується і йде до тих

пiр, поки напруга на затискачах двигуна й на затискачах конденсатора не вирiвняться.

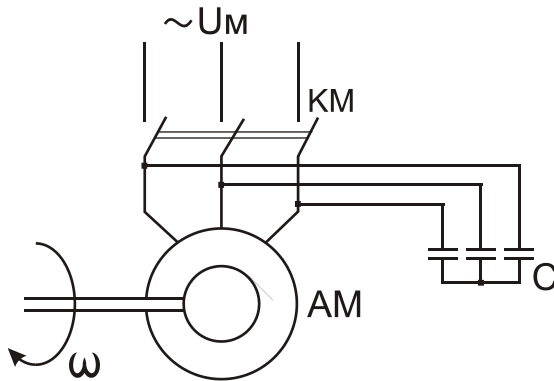


Рисунок 3.48 – Схема динамiчного гальмування при замозбудженнi.

Механiчнi характеристики динамiчного гальмування з самозбудженням (рисунок 3.49) показанi для трьох значень ємностi конденсатора. Зi зменшенням ємностi максимум гальмiвного моменту змiщується у зону бiльших швидкостей й збiльшується його абсолютне значення.

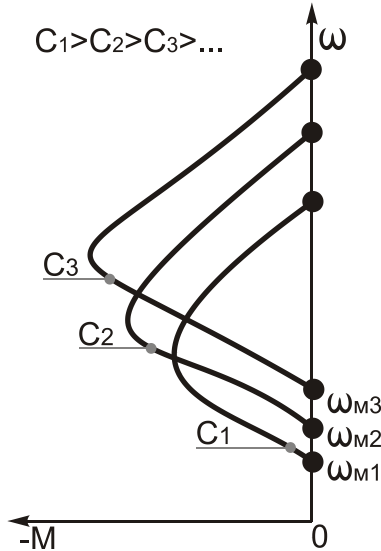


Рисунок 3.49 – Механічні характеристики динамічного гальмування при самозбудженні.

Вадами такого гальмування є наявність так званої, мертвої зони у межах якої гальмівний момент не створюється. Зі зменшенням ємності критична швидкість ω_m цієї зони нечутливості збільшується. Величина критичної швидкості ω_m досить значна і сягає дець $\omega_{m,kr} \approx 0,3 \cdot \omega_{ном}$.

Крім того, для зменшення зони нечутливості необхідно збільшувати ємність, що не економічно.

Достоїнством динамічного гальмування з самозбудженням – відсутність джерела живлення при гальмуванні.

4 РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

4.1 Основні показники регулювання швидкості електропривода

На електропривод покладаються дві вельми важливі взаємопов'язані функції:

- електромеханічне перетворення енергії;
- керування технологічним процесом установки.

Технологічні вимоги визначають необхідність на певних етапах задавати й з потрібною точністю підтримувати на заданому рівні ті чи інші **механічні змінні**:

- положення робочого органу;
- швидкість робочого органу;
- прискорення;
- момент двигуна;
- навантаження й таке інше;

Мета регулювання координат:

- підтримка заданого рівня змінних;
- переміна змінних за потрібним законом;
- обмеження змінних допустимим значенням;
- відпрацювання довільних законів руху, що задаються на вході системи, з потрібною точністю (стежний електропривод).

Можливі способи керування змінними електропривода поділяються на дві численні групи:

- параметричні способи керування, що використовуються у розімкнених системах керування;
- способи автоматичного регулювання координат за допомогою тих або інших зворотних зв'язків (у локально – замкнених та замкнених системах керування).

Необхідність регулювання координат ЕП визначається технологічними вимогами, при цьому вибір раціонального способу регулювання з декількох можливих є важливою задачею, що вирішується при проектуванні ЕП.

Регулювання швидкості є примусове змінювання величини швидкості шляхом використання спеціальних заходів, незалежно від величини і характеру діючого навантаження.

Для регулювання швидкості робочого органу існує дві можливості:

- змінювання швидкості електродвигуна;
- змінювання параметрів кінематичного ланцюга механічної частини ЕП.

Перша реалізується впливом на електродвигун, а друга – на механічну частину ЕП.

Точність регулювання – це відхилення швидкості від її заданого значення під дією збурних факторів, таких як, змінювання навантаження під час регулювання швидкості, змінювання швидкості при регулюванні моменту й таке інше.

Діапазон регулювання швидкості – заданий діапазон регулювання швидкості D характеризує межі змінювання середніх значень швидкості, які можливі при заданому способі регулювання швидкості. Діапазон регулювання позначається літерою “ D велике” й записується у вигляді ділення на одиницю.

Основні узагальнені показники регулювання:

- Плавність регулювання швидкості характеризує стрибок швидкості при переході від даної швидкості до найближчої можливої. Плавність тим вище, чим менше цей стрибок. Чим більше число ступенів регулювання Z , що реалізується, тим вище плавність. Регулювання суттєво залежить від типу електродвигуна та конструкції регулювального пристрою.

- Стабільність кутової швидкості – це змінювання кутової швидкості при заданому відхиленні моменту навантаження, залежить від жорсткості механічної характеристики. Вона тим вища, чим більше жорстка механічна характеристика.

- Напрямок регулювання швидкості, тобто зменшення або збільшення її відносно основної швидкості, залежить від вибраного способу регулювання швидкості. Розрізняють однозонне регулювання швидкості вниз від основної швидкості, однозонне регулювання швидкості вверх від основної швидкості та двозонне регулювання і вверх, і униз від основної швидкості.

- Допустиме навантаження у діапазоні регулювання. Можливість тривалої роботи під навантаженням електропривода з будь-якою швидкістю у заданому діапазоні регулювання визначає необхідність розгляду такого показника регулювання швидкості як допустиме навантаження у діапазоні регулювання.

- Швидкодія характеризується часом регулювання t_p , за який змінна швидкість перший раз досягне заданого значення, часом першого максимуму $t_{\max}$, коли відхилення регульовного параметра досягне першого максимуму, або загальним часом перехідного процесу t_{nn} . Коливальність може характеризуватись часом придушення коливань швидкості $(t_{nn} - t_p)$. Перерегулювання характеризується максимальним відхиленням, протилежним початковому, віднесеному до заданого (усталеного) значення регульовного параметра (швидкості).

- Економічність регулювання швидкості визначається двома факторами:

- первісні витрати на спорудження електропривода, які необхідні для установлення необхідного обладнання;
- експлуатаційні витрати.

4.2 Способи регулювання швидкості

Способи регулювання швидкості впливом на електродвигун слід поділити на дві основні групи.

1-а група. Способи, що забезпечують регулювання швидкості електродвигуна за рахунок змінювання, або регулювання параметрів мережі живлення двигуна. Це, два параметри: напруга мережі та частота мережі.

2-а група. Способи, що забезпечують регулювання швидкості електродвигуна за рахунок змінювання параметрів безпосередньо електродвигуна (активний чи індуктивний опір обмоток двигуна, число витків обмоток, число пар полюсів й таке інше).

4.3 Основні способи регулювання швидкості ДПС НЗ

Для таких електродвигунів, у відповідності до їх електромеханічної характеристики

$$\omega = \frac{U_m - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_m \Phi},$$

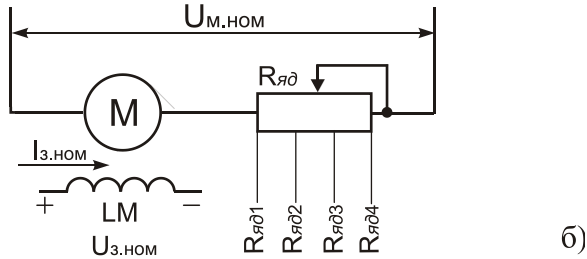
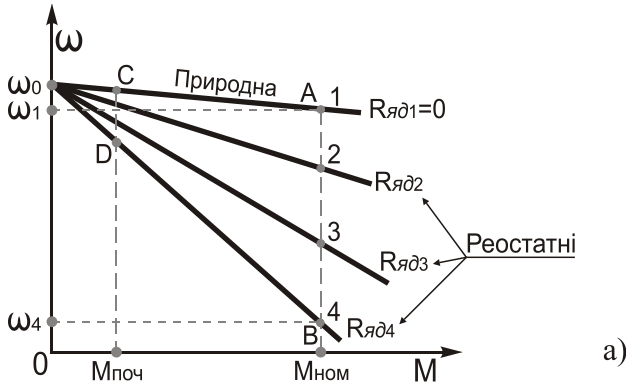
можливі три основні способи регулювання швидкості

- змінювання величини напруги мережі живлення (U_m);
- змінювання опору якірного кола ($R_{\text{я}}$);
- змінювання величини магнітного потоку двигуна (Φ).

Розглянемо їх у такій послідовності.

4.3.1 Регулювання кутової швидкості за допомогою додаткових резисторів у колі якоря

Регулювання кутової швидкості змінюванням опору якірного кола (фрагмент **б** рисунка 4.5) не вимагає особливих пояснень. Цей спосіб впливає з розглянутих раніше реостатних характеристик ДПС НЗ (фрагмент **а** рисунка 4.5).



а – механічна характеристика;

б- схема.

Рисунок 4.5 – Уведення додаткового опору в коло якоря.

Цей спосіб називається реостатним, є вельми простий за своєю реалізацією і тому широко використовується для регулювання швидкості, моменту, струму й інших координат.

Нахил характеристик визначається опором якірного кола (при фіксованому значенні моменту) і при зростанні опору $R_{яд1} < R_{яд2} < R_{яд3} < R_{яд4}$ збільшується (зменшується жорсткість характеристик). Регулювання здійснюється при номінальних параметрах двигуна (змінюється тільки опір $R_{яд}$ якірного кола):

$$U_M = U_{M\text{ном}}; I_z = I_{z\text{ном}}; U_z = U_{z\text{ном}}.$$

Основні показники регулювання швидкості

Діапазон регулювання. Діапазон ($D = \omega_1 : \omega_2$ для номінального навантаження) незначний, не перевищує 2 – 3, зі зменшенням навантаження вироджується до 1 (до швидкості неробочого ходу ω_0). Так при моменті $M_{ном}$ діапазон $D = AB$, а при моменті $M_{н\ddot{p}}$ діапазон $D = CD$ (фрагмент а рисунка 4.5).

Напрямок регулювання. Однозонне, вниз від основної швидкості $\omega_{ном}$.

Плавність регулювання. Визначається конструкцією реостата. Якщо його опір можна змінювати плавно, значить і регулювання швидкості буде плавним. Зазвичай, воно ступінчасте.

Стабільність швидкості. Зменшується в міру зменшення діапазону регулювання. Взагалі стабільність низька. При коливаннях моменту опору M_c у межах $\pm \Delta M_c$ коливання швидкості при швидкості ω_1 складає $\Delta \omega_1$, а при швидкості ω_2 складає $\Delta \omega_2$, тобто стабільність різко погіршується зі зростанням $R_{я0}$.

Допустиме навантаження у діапазоні регулювання. Оскільки для будь-якої швидкості струм навантаження не може перевищувати $I_{яном}$ (за умов нагрівання), то допустимий момент буде

$$M_{дон} = C_M \Phi_{ном} I_{ном} = M_{ном} = Const$$

незалежно від величини швидкості.

Таким чином, регулювання швидкості здійснюється при сталому моменті, що дорівнює номінальному. Потужність зі зростанням швидкості збільшується за лінійним законом

$$P_2 = M_{ном} \omega,$$

оскільки $M_{ном} = Const$, а математично це рівняння прямої типу $y = k \cdot x$, де k є коефіцієнт пропорційності.

Економічність регулювання. Витрати на спорудження способу незначні (мала вартість регулювального реостату $R_{\text{я0}}$).

Якщо робота на зниженій швидкості не тривала, то регулювний реостат не потрібний, можна для цієї мети використати пусковий реостат, який уже є.

4.3.2 Регулювання швидкості ДПС НЗ змінюванням величини магнітного потоку

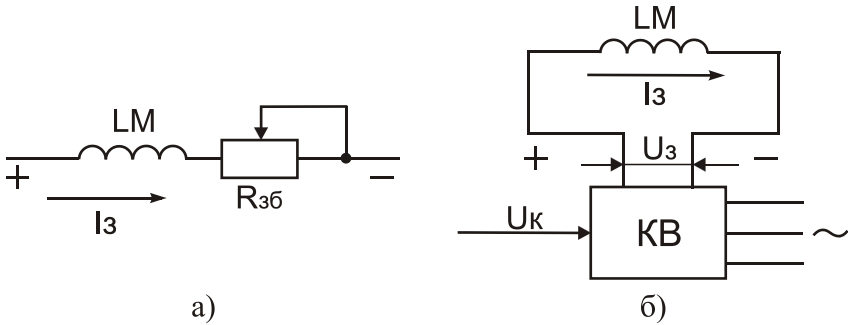
Цей спосіб широко використовується в електроприводах внаслідок простоти його реалізації й значної економічності.

Причини цього обумовлені двома обставинами.

1 обставина. Збільшення магнітного потоку повинно викликатися збільшенням струму збудження, але оскільки номінальний магнітний потік створюється номінальним струмом збудження, то збільшення струму збудження вище номінального викликає додатковий неприпустимий нагрів двигуна.

2 обставина. Двигун розрахований і побудований таким чином, що робоча точка двигуна розташована на кривій намагнічування у межах насичення, тому намагання подальшого збільшення струму збудження не може спричинити збільшення магнітного потоку.

Схема фрагмента **а** рисунка передбачає, що струм збудження і магнітний потік можуть бути зменшеними. У схемі фрагмента **б** рисунка для змінювання струму збудження використовується керований випрямляч KB , вихідна напруга якого U_z регулюється у відповідності до сигналу керування U_k . Ця схема більш економічна й використовується для регулювання струму збудження більш потужних двигунів.



а – схема на базі резистора;

б - схема на базі перетворювача.

Рисунок 4.6 – Схеми вмикання обмотки збудження.

Сім'ю штучних характеристик регулювання можна одержати (рисунок 4.7) при розгляді зміни координат точок неробочого ходу ($\omega_{01}; \omega_{02}; \omega_{03}; \omega_{04}$) й короткого замикання ($M_{\kappa 31}; M_{\kappa 32}; M_{\kappa 33}; M_{\kappa 34}$) при варіюванні магнітного потоку, оскільки у відповідності до формули

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{м}} \Phi},$$

змінювання магнітного потоку призведе до змінювання ω_0 (електромеханічні характеристики перетинають вісь ординат у різних точках).

Струм короткого замикання визначається із формули

$$\omega = \frac{U_{\text{м}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_{\text{м}} \Phi}.$$

Оскільки при КЗ швидкість $\omega_{\kappa 3} = 0$ (якір нерухомий), то

$$0 = \frac{U_{\text{м}} - I_{\kappa 3} R_{\kappa 3}}{C_{\text{м}} \Phi}, \quad U_{\text{м}} - I_{\kappa 3} \cdot R_{\text{я}} = 0,$$

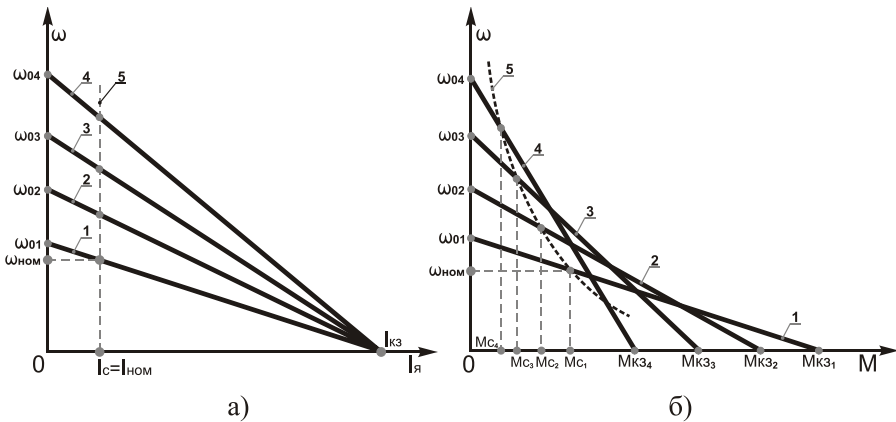
$$I_{кз} = \frac{U_M}{R_{я}}.$$

Тобто струм короткого замикання від магнітного потоку не залежить, а точка короткого замикання $I_{кз}$ буде спільною для сім'ї електромеханічних характеристик $\omega = f(I_{я})$.

Момент короткого замикання має вираз

$$M_{кз} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{кз},$$

оскільки $I_{кз} = Const$, то при зменшенні магнітного потоку пропорційно йому зменшується й момент $M_{кз}$.



а – електромеханічна характеристика;

б – механічна характеристика.

Рисунок 4.7 – Статхарактеристики при послабленні поля.

Основні показники регулювання швидкості

Діапазон регулювання. Більшість ДПС НЗ звичайних серій не передбачають глибокого регулювання цим способом, у них перевищення швидкості над номінальною складає усього 10 – 20%, і цього досить для виробничих механізмів широкого використання.

Напрямок регулювання. Однозонне регулювання уверх від основної швидкості $\omega_{ном}$.

Плавність регулювання. Визначається конструкцією реостата $R_{зб}$, або особливостями керованого випрямляча. Проблем створення високої плавності регулювання практично немає, оскільки струм збудження суттєво менший, ніж струм якірного кола.

Стабільність швидкості досить висока, хоча вона дещо понижується при ослабленні магнітного поля.

Допустиме навантаження в діапазоні регулювання. Двигун може навантажуватись допустимим струмом I_c який дорівнює номінальному для будь-якої швидкості в усьому діапазоні регулювання

$$I_c = I_{\bar{m}},$$

(лінія 5 електромеханічної характеристики, фрагмент а рисунка 4.7). Допустимий момент навантаження при цьому визначається так:

$$M_{доп} = C_m \Phi_{шт} I_{ном} \quad (4.8),$$

де $\Phi_{шт}$ – магнітний потік зі штучної характеристики.

Оскільки при цьому способі регулювання

$$\Phi_{шт} < \Phi_{ном},$$

то й допустимий момент менший номінального

$$M_{доп} < M_{ном},$$

тобто двигун за умов нагрівання не може бути навантаженим на номінальний момент.

Рівняння для ЕРС якоря на природній та штучній характеристиках при $I_{я} = I_{я.ном}$:

$$\left. \begin{aligned} E_{я(пр.)} &= C_m \Phi_{ном} \omega_{ном} = U_{м.ном} - I_{я.ном} R_{я}, \\ E_{я(шт.)} &= C_m \Phi_{шт} \omega_{шт} = U_{п.ном} - I_{я.ном} R_{я}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Із системи (4.9) видно, що права частина рівняння однакова, значить однакова й ліва:

$$E_{я(пр.)} = E_{я(шт.)}; U_{м.ном} - I_{я.ном} R_{я} = Const \quad (4.10)$$

Із системи (4.9) за умов (4.10) можна записати співвідношення

$$\Phi_{шт} = \Phi_{ном} \frac{\omega_{ном}}{\omega_{шт}} \quad (4.11)$$

де $\omega_{шт}$ – швидкість на штучній характеристиці за умов, що $I_{я} = I_{я.ном}$.

У рівняння (4.8) підставимо значення потоку $\Phi_{шт}$ із рівняння (4.11), одержимо:

$$M_{дон} = C_{м} \cdot \Phi_{шт} \cdot I_{я.ном} = C_{м} \cdot \Phi_{ном} \cdot \frac{\omega_{ном}}{\omega_{шт}} \cdot I_{ном},$$

$$M_{дон} = (C_{м} \cdot \Phi_{ном} \cdot I_{я.ном} \cdot \omega_{ном}) \frac{1}{\omega_{шт}}.$$

Позначимо $A = C_{м} \cdot \Phi_{ном} \cdot I_{я.ном} \cdot \omega_{ном} = Const$, тоді

$$M_{дон} = \frac{A}{\omega_{шт}}. \quad (4.12)$$

Таким чином, при регулюванні швидкості таким способом при якомусь збільшенні швидкості над основною слід зменшувати момент навантаження за гіпербологічним законом.

Якщо рівняння (4.11) помножити на $C_{м} \cdot I_{ном}$ ($C_{м} \cdot I_{ном} \neq 0$), то одержимо

$$C_{м} \cdot \Phi_{шт} \cdot I_{я.ном} = C_{м} \cdot \Phi_{ном} \cdot I_{я.ном} \cdot \frac{\omega_{ном}}{\omega_{шт}},$$

$$M_{дон} = M_{ном} \frac{\omega_{ном}}{\omega_{шт}},$$

$$M_{дон} \cdot \omega_{шт} = M_{ном} \cdot \omega_{ном},$$

$$P_{дон} = P_{ном},$$

$$P_{дон} = Const.$$

При роботі ДПС НЗ на штучній характеристиці він може бути завантажений на свою номінальну потужність $P_{ном}$. Таким чином, цим способом здійснюється регулювання при сталій потужності.

Якщо двигун не призначений для глибокого регулювання швидкості, то перевищення швидкості регулювання над основною не повинно бути 10 – 20 % (для спеціально сконструйованих для цього ДПС, таке перевищення може складати 3 – 5 разів). Нижня межа швидкості обмежується насиченістю магнітної системи.

4.3.3 Регулювання швидкості ДПС НЗ шунтуванням якоря

Цей спосіб використовують з метою отримання більш жорстких характеристик на малих швидкостях.

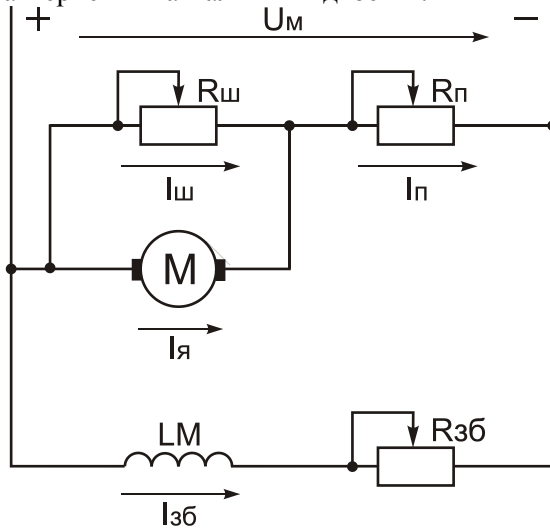


Рисунок 4.8 – Схема шунтування якоря.

Шунтування якоря резистором $R_{ш}$ виконується при обов'язковому вмиканні послідовного резистора $R_{п}$. Резистори $R_{ш}$ та $R_{п}$ являють собою подільник напруги. Регулювання напруги можливе

в усіх трьох випадках змінювання параметрів подільника напруги

$$R_{ui} = Var, R_n = Const;$$

$$R_{ui} = Const, R_n = Var;$$

$$R_{ui} = Var, R_n = Var.$$

При цьому змінюється коефіцієнт ділення напруги мережі α

$$\alpha = \frac{R_{ui}}{R_{ui} + R_n}.$$

Слід відзначити, що на роботу такого подільника напруги у значній мірі впливає навантаження двигуна, оскільки струм I_n , що споживається з мережі, (а отже і падіння напруги на резисторі R_n) залежать від струму якоря I_α .

Статичні характеристики залишаються лінійними, а кутова швидкість ідеального неробочого ходу ω'_0 порівняно з ω_0 зменшиться у $1/\alpha$ раз. При цьому жорсткість реостатної характеристики з шунтуванням 3 значно більше, ніж жорсткість реостатної характеристики без шунтування 2.

Швидкість ω'_A можна одержати за звичайних умов (характеристика 2) й при шунтуванні (характеристика 3).

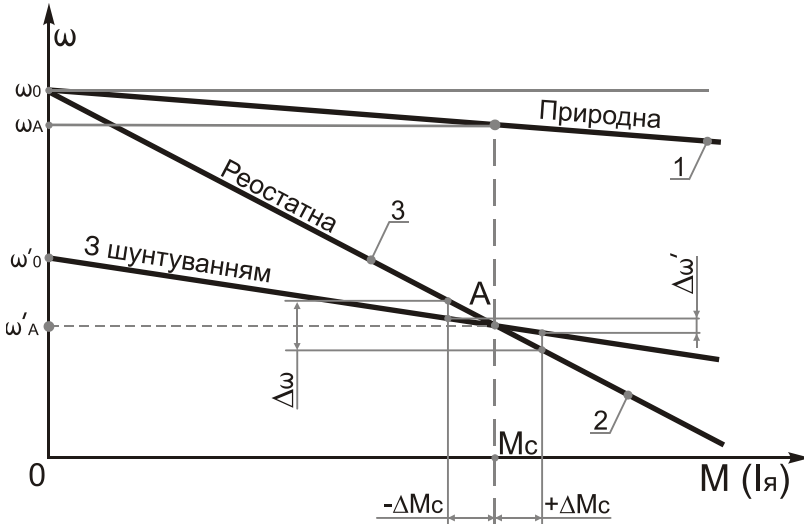


Рисунок 4.9 – Статхарактеристики ДПС НЗ при шунтуванні якоря.

Основні показники регулювання швидкості порівняно зі звичайним реостатним регулюванням:

- більш стабільне регулювання швидкості (при заданих $\pm \Delta M_c$ перепад швидкості $\Delta \omega'$ менше $\Delta \omega$), рисунок 4.9;
- більший діапазон регулювання (до $D=6:1$) за рахунок вищої стабільності (жорсткості);
- допустимий момент навантаження, як і при реостатному регулюванні, залишається незмінний, рівний номінальному (струм збудження такий же, як у реостатному);
- втрати енергії при однаковому, з реостатним регулюванням діапазоні більш, ніж у реостатному.

4.3.4 Регулювання швидкості ДПС НЗ змінюванням напруги живлення якоря

Регулювання швидкості таким способом здійснюється при живленні якоря ДПС НЗ від керованого джерела (керованого перетворювача *КП*), утворюючи систему перетворювач-двигун

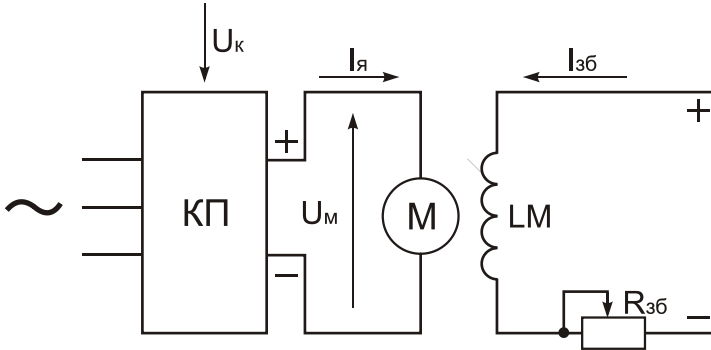


Рисунок 4.10 – Схема регулювання напруги живлення ДПС НЗ.

Обмотка збудження LM ДПС НЗ живиться від окремого джерела постійного струму, наприклад, від некерованого (нерегульованого) випрямляча. Перетворювач $КП$ характеризується передатним коефіцієнтом (коефіцієнтом підсилення)

$$\hat{E}_i = \frac{U_i}{U_{\hat{e}}},$$

де $U_{\hat{e}}$ – вхідний керуючий сигнал.

Статичні характеристики ДПС НЗ, при знехтуванні реакцією якоря двигуна, будуть прямолінійними, їх вигляд наведений на рисунку 4.11.

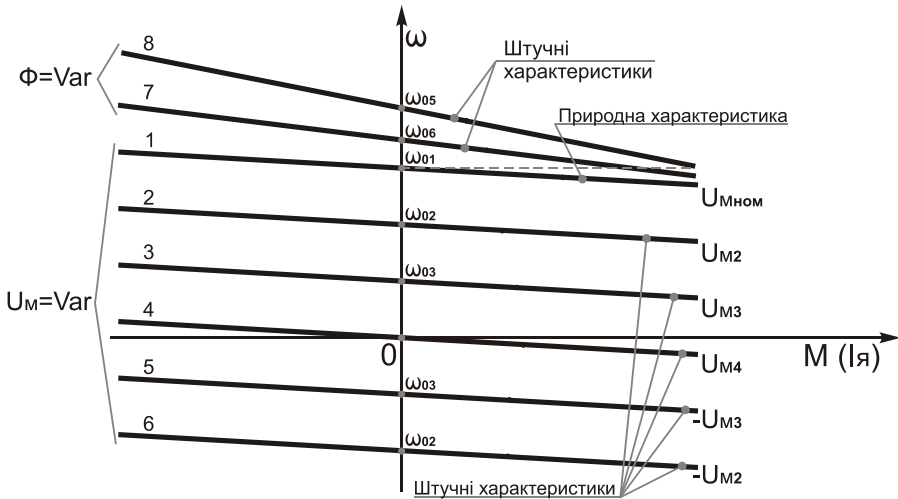


Рисунок 4.11 – Статхарактеристики ДПС НЗ при змінюванні напруги живлення якоря.

Основні показники регулювання швидкості

Діапазон регулювання значний (до $D=20:1$). Нижня межа швидкості визначається падінням напруги у якорному колі. Навіть при незначних коливаннях навантаження з'являються значні коливання швидкості, і навіть зупинка якоря. Регулювання швидкості вверх від номінальної напруги практично неможливе із-за насичення магнітної системи двигуна яке є верхньою межею швидкості.

Напрямок регулювання. Регулювання однозначне вниз від основної до мінімальної із реверсом від мінімальної до основної у зворотному напрямку.

Плавність регулювання. Регулюється відповідно плавності регулювання напруги.

Стабільність швидкості. Постійна, незалежна від величини навантаження. Стабільність досить висока, оскільки характеристики досить жорсткі.

Допустиме навантаження. Регулювання швидкості здійснюється при сталому моменті, оскільки струм збудження (магнітний потік) стала величина, а струм навантаження не може

перевищувати номінальний струм якоря $I_{я.ном}$.

$$M_{дон} = C_M \Phi_{ном} I_{я.ном} = M_{ном}.$$

Економічність регулювання. Експлуатаційні витрати досить малі при регулюванні напруги живлення, тому з цього погляду спосіб досить економічний, але первісні витрати на спорудження електропривода значні із-за високої вартості перетворювача.

Електромашинний перетворювач (система Г-Д).

Схема такої системи, що має назву система генератор-двигун, (система Г-Д), наведена на рисунку 4.12.

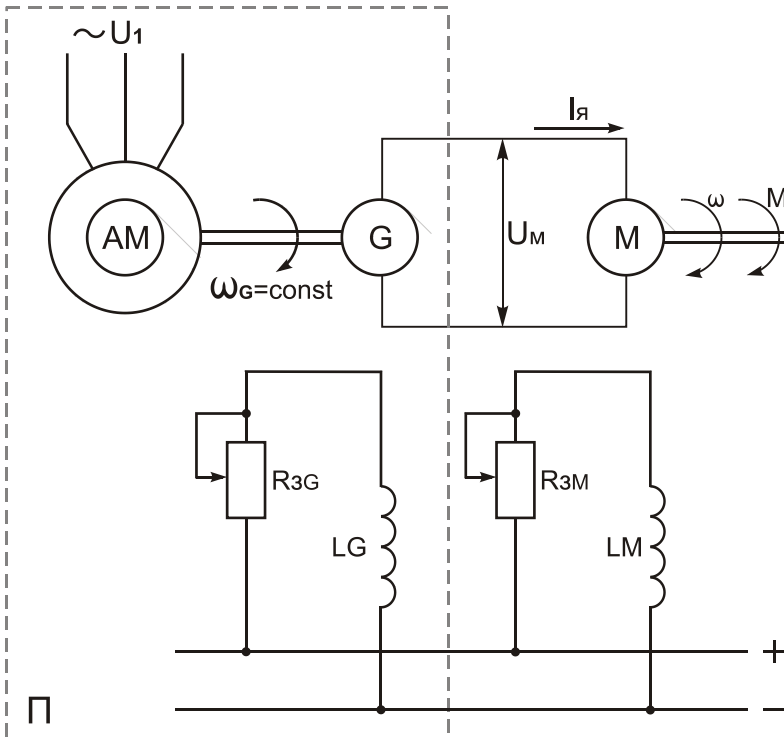


Рисунок 4.12 – Електромашинний перетворювач для живлення якірного кола

ДПС.

Генератор G разом зі своїм приводним двигуном (асинхронний двигун AM) утворюють електромашинний перетворювач Π – керований перетворювач нерегульованої змінної напруги мережі U_1 (що живить AM) у регульовану постійну напругу U_m (що живить приводний двигун M) – керований випрямляч Π .

Регулювання напруги U_m для живлення якоря двигуна M відбувається за рахунок змінювання струму збудження генератора G за допомогою резистора R_{3G} . Напругу U_m можна отримати досить малою (при мінімальному збудженні генератора) й збільшувати до максимального значення (до дозволеної межі перенасичення магнітної системи генератора). Але це не є межею підвищення швидкості двигуна M .

Верхньою межею регулювання швидкості буде допустима міра ослаблення поля двигуна M . Реверсування двигуна M здійснюється зміною полярності струму живлення обмотки збудження генератора.

Основні переваги системи Г – Д

Великий діапазон й плавність регулювання.

Висока жорсткість статхарактеристик та їх лінійність.

Можливість одержання усіх енергетичних режимів роботи ДПС НЗ, у тому числі й рекуперативне гальмування.

Простота регулювання швидкості й здійснення усіх режимів роботи, оскільки вся регульовна, пускова й комутаційна апаратура винесена з якорного кола й перенесена у кола збудження (малий струм керування). Це вигідно й економічно.

Води системи Г – Д

Низька швидкодія, що є найбільш суттєвим недоліком при використанні сучасних електроприводів.

Значна потужність сигналу керування, що не дозволяє використовувати при керуванні безпосередньо від блочних елементів керування на рівні інтегральних мікросхем.

Велика установлена потужність (потрійна).

Низький ККД (до 70 – 80 % у самих потужних).

Нестійка робота двигуна на низьких швидкостях (коли величина U_m сумірна з величиною падіння напруги на якорі).

Значні експлуатаційні витрати (ремонт, обслуговування), великі масогабаритні показники (фундаменти й таке інше).

Значні вібрації і шуми.

Система статичний перетворювач – двигун (СП – Д)

Вони являють собою керовані реверсивні або нереверсивні випрямлячі.

Принцип дії, властивості та характеристики системи тиристорний перетворювач – двигун (ТП – Д) за схемою, де перетворювачем вибраний трифазний керований тиристорний нереверсивний випрямляч, зібраний за мостовою схемою.

Перетворювач (рисунок 4.13) має узгоджувальний трансформатор TH , 6 тиристорів $VS1$ – $VS6$, систему імпульсно-фазового керування СІФК та згладжувальний реактор L .

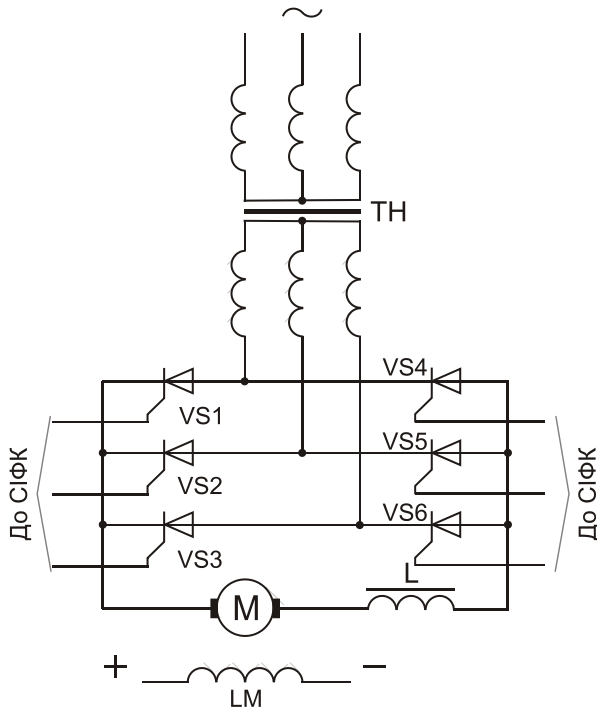
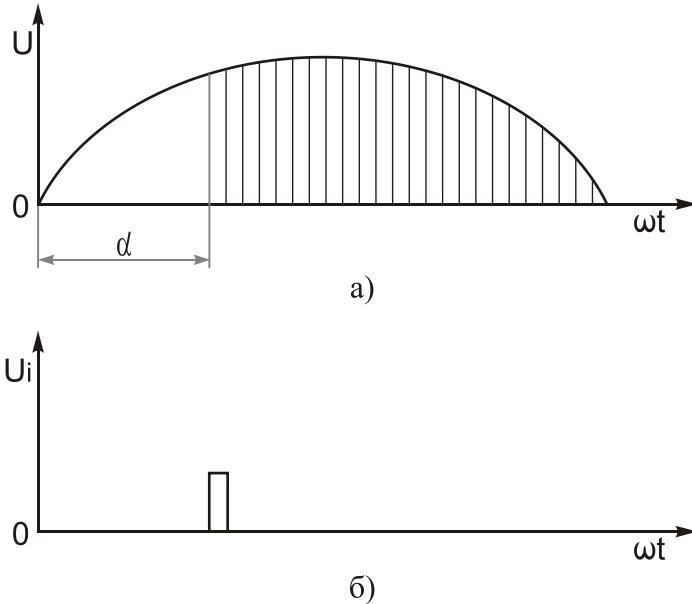


Рисунок 4.13 – Схема ТП-Д.

Перетворювач забезпечує регулювання напруги, що живить якірне коло двигуна, за рахунок зміни кута керування тиристорів α . Кут α є кут затримки відкриття тиристорів відносно моменту їх природного відкриття (рисунок 4.14, фрагмент а).



а – напруга живлення;

б – напруга керування.

Рисунок 4.14 – Графік змінювання напруги.

Коли $\alpha = 0$ тиристори одержують імпульси керування U_i від СІФУ у момент їх природного відкриття, перетворювач здійснює двополуперіодне випрямлення й до ДПС прикладається повна напруга. Якщо за допомогою СІФУ здійснити подачу імпульсів U_i не в момент природного відкриття тиристорів (рисунок 4.14, фрагмент б), а з зсувом на кут $\alpha \neq 0$, то ЕРС перетворювача зменшиться і до ДПС буде підводитись менша напруга.

Для зменшення пульсацій струму в коло якоря ДПС підмикається реактор L .

Статичні характеристики електропривода для трифазного мостового нереверсивного випрямляча наведені на рисунку 4.15.

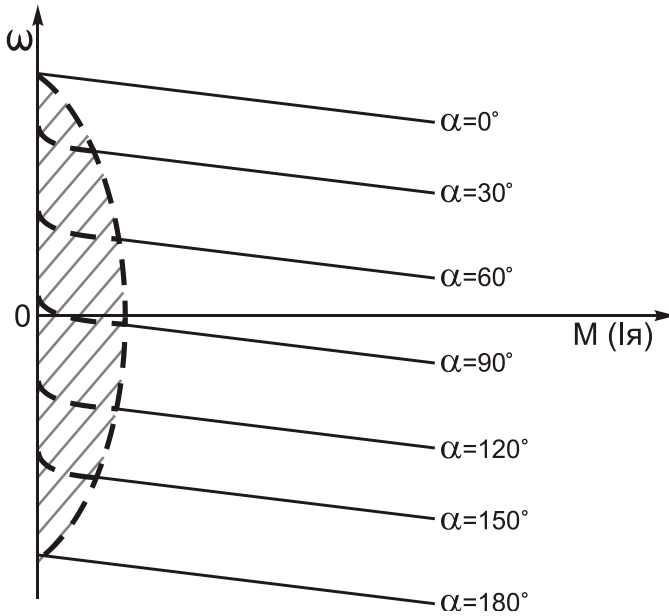


Рисунок 4.15 – Статхарактеристики ЕП у системі ТП-Д.

Їх особливістю є наявність ділянки переривистих струмів (виділена на рисунку штриховою лінією й заштрихована).

При скінчених значеннях індуктивності згладжувального реактора й малих навантаженнях настає режим переривистих струмів, при якому має місце різке піднімання характеристик. Для одержання характеристик, що розташовуються у чотирьох квадрантах, слід використовувати реверсивні перетворювачі.

Переваги системи ТП - Д:

- плавність й значний діапазон регулювання швидкості, до $D=10:1-16:1$;
- висока жорсткість характеристик;

- високий ККД електропривода за рахунок високого ККД силових елементів перетворювача ($\eta_{трансф.} = 0,93 - 0,98$; $\eta_{моста} = 0,9 - 0,92$);

- висока швидкодія, що особливо важливо для швидкісних глибокорегульованих електроприводів;

- малий рівень величини сигналу керування;

- порівняно з електромашинними перетворювачами кращі масогабаритні показники, крім того, безшумність у роботі й простота обслуговування.

Води системи ТП - Д:

- одностороння провідність напівпровідникових елементів вимагає для реверсування двох комплектів випрямлячів;

- випрямлений струм має пульсації, що обумовлює погіршення роботи ДПС;

- перетворювач спотворює форму напруги й струму мережі живлення;

- перетворювач сам є джерелом радіозавад;

- мала перевантажувальна здатність як за струмом так й за напругою.

4.4 Основні способи регулювання швидкості двигунів постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ)

Регулювання координат ДПС ПЗ може відбуватися тими ж способами, що і ДПС НЗ:

- шляхом змінювання опору додаткового резистора у якірному колі;

- шляхом змінювання магнітного потоку;

- шляхом змінювання напруги живлення двигуна.

4.4.1 Регулювання швидкості ДПС ПЗ за допомогою резисторів у якірному колі

Схема для реалізації цього способу має вигляд зображений на рисунку 4.16.

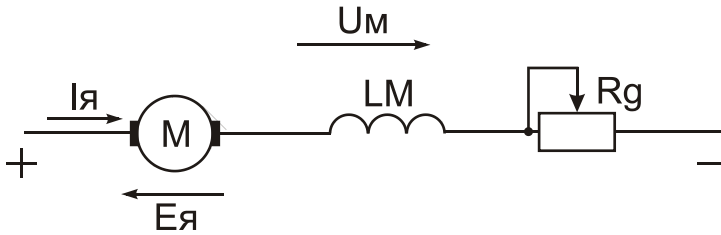


Рисунок 4.16 – Схема з додатковим резистором у якорному колі.

При побудові реостатних характеристик слід пам'ятати,
 $I_{я} \rightarrow 0$; $M \rightarrow 0$; $\Phi \rightarrow 0$; $\omega \rightarrow \infty$.

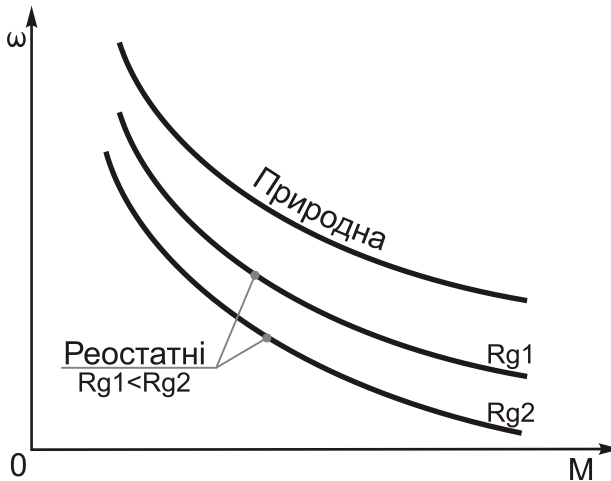


Рисунок 4.17 – Механічні характеристики.

Регулювання швидкості здійснюється униз від основної, жорсткість характеристик зменшується зі зростанням величини додаткового опору R_o (рисунок 4.16). Діапазон регулювання $D = (2-3):1$ й залежить від величини навантаження (зменшується зі зменшенням навантаження). Спосіб не економічний, так як великі втрати енергії на додатковому резисторі у колі якоря. Але спосіб широко використовується у електроприводах піднімально-транспортних механізмів із-за простоти реалізації, При цьому реостат

для пуску, гальмування та регулювання швидкості використовується один і той же.

4.4.2 Регулювання швидкості ДПС ПЗ змінюванням магнітного потоку

Схема для реалізації змінюванням магнітного потоку

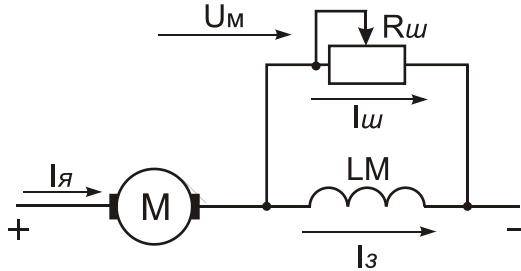


Рисунок 4.18 – Схема зі шунтуванням обмотки збудження.

Тут паралельно обмотці збудження підімкнений шунтуючий резистор $R_{ш}$, змінюючи опір якого можна змінювати струм обмотки збудження, а отже й магнітний потік.

$$I_z = I_я - I_{ш}$$

Оскільки струм а отже й магнітний потік, можна тільки зменшувати, то регулювання швидкості буде здійснюватись уверх від основної, а механічні характеристики двигуна будуть мати вигляд наведений на рисунку 4.19.

Тут також для усіх характеристик ордината є асимптотою, бо як і у попередньому випадку

$$I_я \rightarrow 0; M \rightarrow 0; \Phi \rightarrow 0; \omega \rightarrow \infty.$$

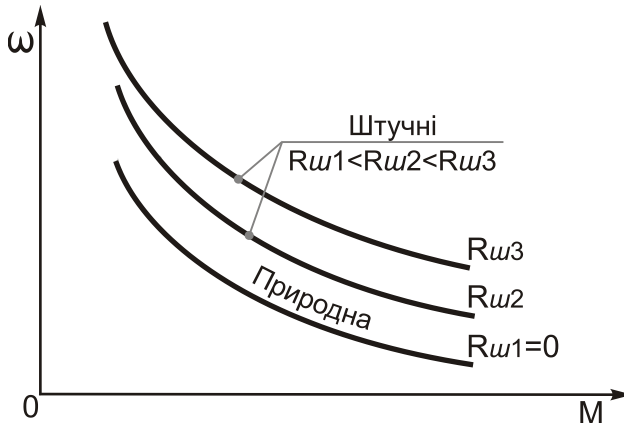


Рисунок 4.19 Механічні характеристики.

Показники регулювання – послаблення поля: спосіб економічний, бо втрати при послабленні потоку малі (малий опір LM , значить малий і опір R_{ω}); регулювання здійснюється при сталій потужності, а при збільшенні швидкості допустимий момент навантаження зменшується за гіперболічним законом; діапазон регулювання незначний $D=(2-2.5):1$ – обмежується якістю комутації та механічною міцністю якоря.

4.4.3 Регулювання швидкості ДПС ПЗ змінюванням напруги живлення

Регулювання здійснюється у відповідності до схеми, де живлення якоря забезпечує керований випрямляч КП, утворюючи систему перетворювач – двигун (рисунок 4.20).

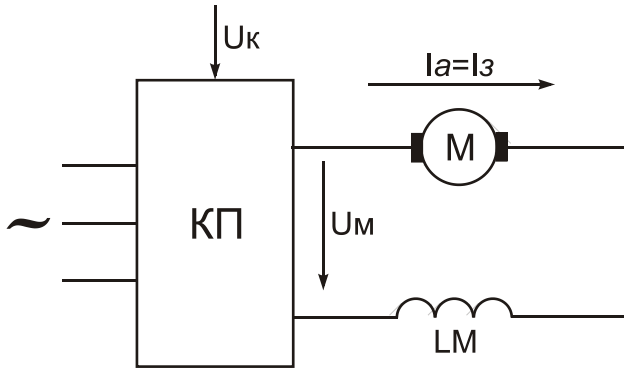


Рисунок 4.20 – Змінювання напруги живлення за допомогою керованого випрямляча.

Вихідна напруга перетворювача U_m регулюється у відповідності до вхідного сигналу керування U_{δ} .

Жорсткість характеристик не змінюється при зменшенні напруги, як і раніше вісь абсцис є асимптотою характеристик, бо $I_a \rightarrow 0$; $M \rightarrow 0$; $\Phi \rightarrow 0$; $\omega \rightarrow \infty$.

Показники регулювання у основному відповідають таким, як при регулювання швидкості змінюванням напруги ДПС НЗ.

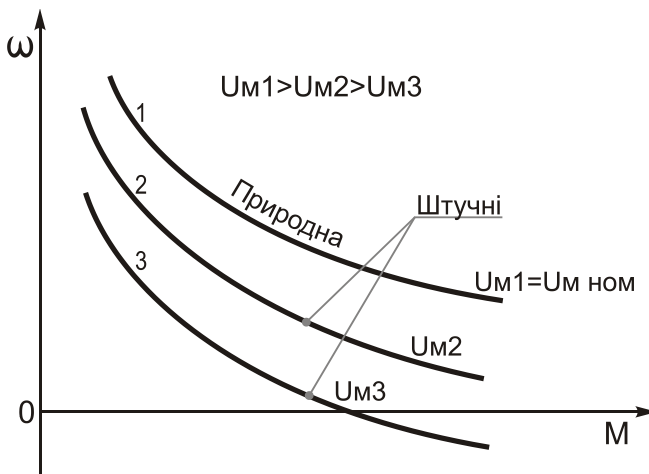
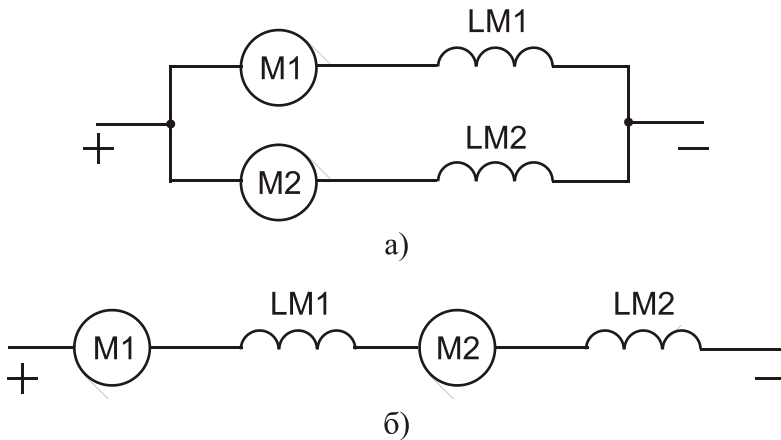


Рисунок 4.21 – Механічні характеристики.

Різновидом способу регулювання швидкості ДПС ПЗ змінюванням напруги живлення двигуна є змінювання схеми вмикання ДПС.

Змінювання напруги, що підводиться до кожного двигуна, здійснюється за рахунок схеми паралельно-послідовного з'єднання двигунів між собою (рисунок 4.22).

Так для дводвигунного електропривода при паралельному з'єднанні двигунів (фрагмент **а** рисунка) на кожний двигун припадає повна (номінальна) напруга й двигуни обертаються з відповідною швидкістю, а при послідовному з'єднанні двигунів (фрагмент **б** рисунка) на кожний двигун припадає половинна напруга, і двигуни обертаються з удвоє меншою швидкістю. Отже цей спосіб є ступінчастим регулюванням. Нижче наведені характеристики такого регулювання, дивись рисунок 4.23.



а – паралельне з'єднання двигунів;

б – послідовне з'єднання двигунів.

Рисунок 4.22 – Змінювання напруги живлення за допомогою схеми з'єднання двигунів між собою.

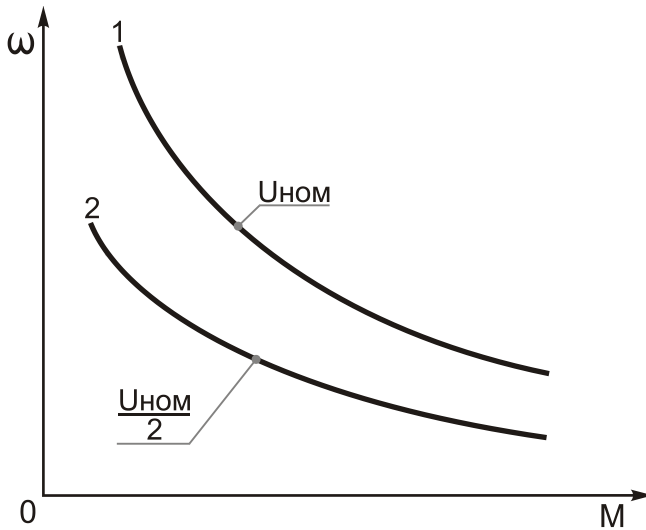


Рисунок 4.23 – Механічні характеристики.

Таким чином, при пуску ЕП двигуни з'єднують послідовно, щоб мати меншу швидкість для полегшення умов пуску.

4.5 Регулювання координат АД

ДПС мають низку вад порівняно з АД:

- наявність джерела постійного струму для живлення двигуна;
- масогабаритні показники гірші майже у два рази;
- вартість ДПС більше, ніж АД (у 3 – 5 разів);
- будова й конструкція ДПС значно складніша, а надійність роботи гірша.

Таким чином, АД за експлуатаційними та економічними показниками перевершують ДПС, але за технічними характеристиками й властивостями поступаються ним.

Найбільш широке розповсюдження одержали наступні способи регулювання швидкості АД:

- за допомогою резисторів у колах ротора й статора;
- змінюванням числа пар полюсів;
- змінюванням напруги живлення статора;

- частотне регулювання;
- спеціальне (каскадне, імпульсне й інше) регулювання.

4.5.1 Регулювання швидкості АД за допомогою резисторів у колі ротора

Використовується для АД з фазним ротором, бо цей двигун має контактні кільця для підімкнення резистора. Цей спосіб має просту реалізацію.

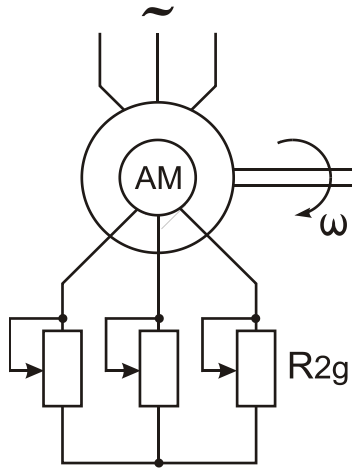
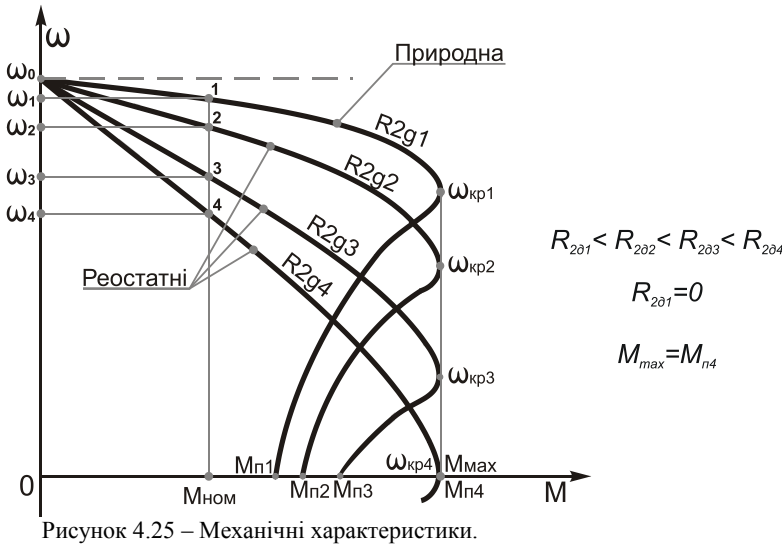


Рисунок 4.24 – Схема з резистором в колі ротора.

Характеристики й показники регулювання

Здійснюється регулювання униз від основної, однозонне. Краще використання двигуна буде при регулювання швидкості з незмінним моментом навантаження, що дорівнює номінальному, як і для ДПС НЗ при уведенні резисторів у коло якоря. Діапазон регулювання залежить від навантаження (зменшується при зниженні навантаження), а із-за суттєвого зниження жорсткості при зростанні $R_{2\bar{a}}$ цей діапазон незначний і складає $D = (2-3):1$. Характеристики наведені на рисунку 4.25.



При регулюванні швидкості цим способом виникають втрати енергії, оскільки резистор який у колі головного струму – значного струму ротора. Тому доцільно використовувати його при незначному діапазоні регулювання швидкості й невеликій тривалості роботи на низьких швидкостях.

Особливості механічної характеристики:

- швидкість ідеального неробочого ходу ω_0 не змінюється при змінюванні величини $R_{2\bar{a}}$;
- максимальний момент двигуна $M_{\max}$ при регулюванні також практично не змінюється;
- критична швидкість (критичне ковзання) залежить від величини $R_{2\bar{a}}$, критична швидкість зменшується (ковзання зростає) при збільшенні $R_{2\bar{a}}$.

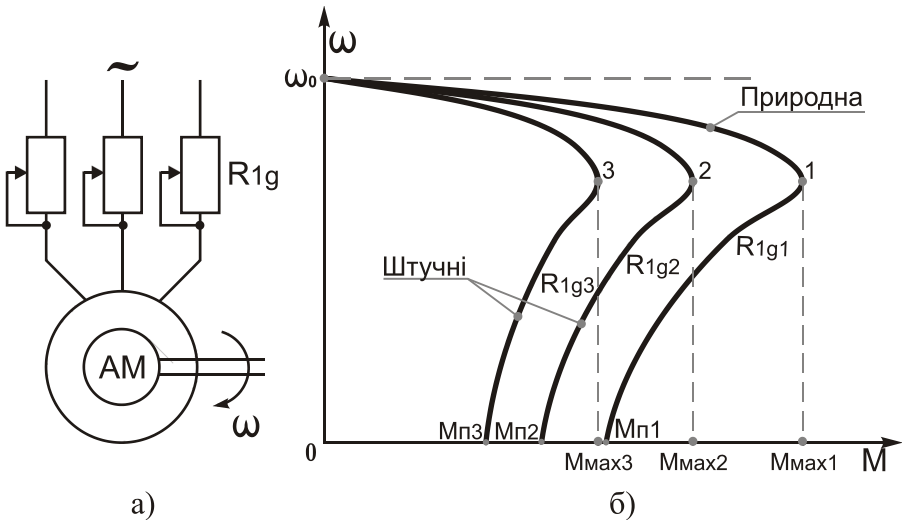
4.5.2 Регулювання координат АД за допомогою резисторів у колі статора

Цей спосіб застосовують для АД з короткозамкненим ротором. Регулювання швидкості малоефективне, діапазон регулювання

швидкості незначний, жорсткість характеристик не стала, перевантажувальна здатність двигуна також не стала й зменшується зі зростанням опору $R_{1\bar{a}}$.

Особливості механічних характеристик:

- швидкість ідеального неробочого ходу ω_0 не залежить від опору $R_{1\bar{a}}$;
- пусковий момент зменшується зі зростанням опору $R_{1\bar{a}}$;
- жорсткість характеристик знижується зі зростанням $R_{1\bar{a}}$.



а – схема;

б – характеристики.

Рисунок 4.26 – Спосіб регулювання з резистором в колі статора.

Цей спосіб застосовується частіше для регулювання струму і моменту АД з короткозамкненим ротором, для їх обмеження у перехідних процесах при пуску, реверсі й гальмуванні.

4.5.3 Регулювання швидкості АД змінюванням числа пар полюсів

Цей спосіб застосовують для тих же АД як і попередній, оскільки змінювання числа пар полюсів у таких АД слід тільки на обмотці статора.

Фізична можливість регулювання швидкості цим способом випливає із суті кутової швидкості обертового магнітного поля

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

де f – частота струму живлення статора;
 p – число пар полюсів.

Одержати можна обмежену кількість фіксованих швидкостей, тому що збільшення їх призвело б до поганого використання активних матеріалів двигуна. Отже, для змінювання числа пар полюсів є два напрямки.

1 напрямок. На статорі розташовується декілька обмоток на різне число p , які по черзі вмикаються на необхідну швидкість (не доцільно вибирати більше двох обмоток статора).

2 напрямок. На статорі розташована одна обмотка, облаштована перемикачем, який забезпечує перемикання обмотки на різне число p (число фіксованих швидкостей не доцільно вибирати більше двох).

Переважає більшість багатошвидкісних АД – це двошвидкісні.

У полюсоперемикальних обмотках перехід від схеми з більшим p до схеми з меншим p можливий, як при паралельному, так і при послідовному вмиканні двох однакових частин обмоток кожної фази.

Розглянемо це на прикладі спрощеної обмотки статора, яка має дві однакових половини, складених з одного витка (тобто з двох провідників). Другими словами, обмотка статора у спрощеному вигляді має дві секції:

- 1-а секція з позначеннями початку і кінця 1Н – 1К;
- 2-а секція з позначеннями початку і кінця 2Н – 2К.

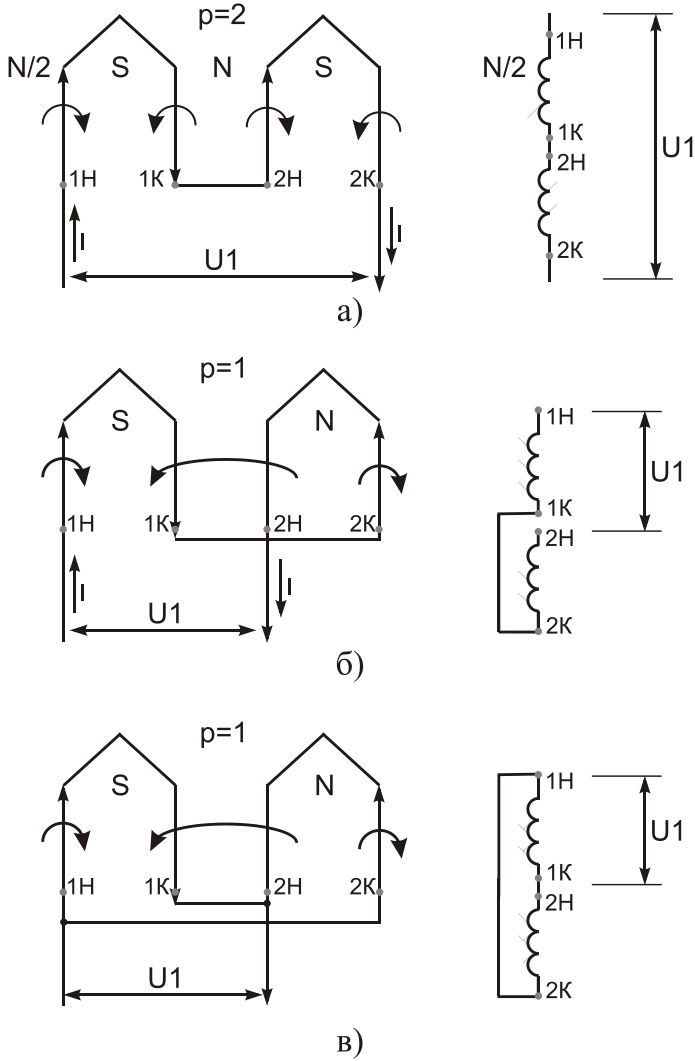
На фрагменті **а** рисунка 4.27 показана схема з'єднання двох секцій у фазу, струм якої створює систему з чотирма полюсами ($p = 2$). На фрагменті **б** показана схема фази з двома полюсами ($p = 1$) при послідовному з'єднанні секцій, а на фрагменті **в** – з двома полюсами ($p = 1$) при паралельному з'єднанні обмоток.

У двох останніх випадках число p зменшилось у два рази, тобто швидкість поля збільшилась у два рази.

Визначимо допустиму потужність АД для трьох вищенаведених з'єднань обмоток, якщо допустимий струм секції

$$I_{1\partial\partial n} = I_{1\text{юм}}$$

залишається незмінним при перемиканні схем.



а – чотириполюсна система;

б – двополюсна система при послідовному з'єднанні;

в - двополюсна система при паралельному.

Рисунок 4.27 – Схеми переходу на менше число пар полюсів полюсоперемикальних обмоток АД.

Схема фрагмента **а** рисунка 4.27 ($p = 2$)

$$P_{1\partial on(2)} = 3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1.$$

Схема фрагмента **б** рисунка 4.27 ($p = 1$)

$$P_{1\partial on(1)} = 3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1.$$

Схема фрагмента **в** рисунка 4.27 ($p = 1$)

$$P_{1\partial on(1)} = 3U_1 \cdot 2I_1 \cdot \cos \varphi_1.$$

У схемі **в** допустима потужність збільшується у два рази, тому що напруга залишається незмінною до і після перемикавання, а допустимий струм можна збільшити у два рази, оскільки у два рази збільшився перетин проводів, якими тече струм.

Допустимий момент для усіх трьох випадків визначається за формулою

$$M_{\partial on} = \frac{P_{\partial on}}{\omega}.$$

При цьому слід урахувувати, що, прийнявши швидкість для $p = 2$ за ω_1 , швидкість для $p = 1$ буде $2\omega_1$.

Тоді остаточно

$$\dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(2)} = \frac{D_{\ddot{a}\ddot{n}}}{\omega} = \frac{3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\omega_1} \Bigg\} \text{ (схема а);}$$

$$\left. \begin{aligned} p &= 1, \\ \dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(1)} &= \frac{3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{2\omega_1}, \\ \dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(1)} &= \frac{\dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(2)}}{2}, \end{aligned} \right\} \text{ (схема б);}$$

$$p = 1,$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(1)} &= \frac{3U_1 \cdot 2I_1 \cdot \cos \varphi_1}{2\omega_1}, \\ \dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(1)} &= \dot{I}_{\ddot{a}\ddot{n}(2)}, \end{aligned} \right\} \text{ (схема в).}$$

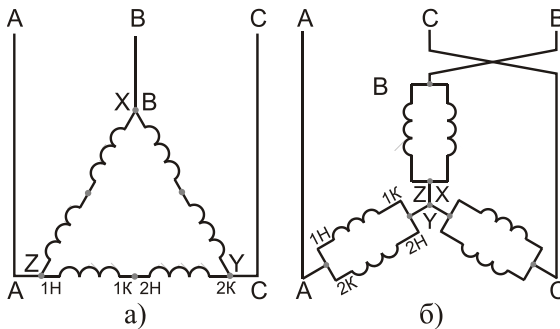
Таким чином, допустимий момент двигуна для $p=2$ і для $p=1$ за схемою **б** – різні. При переході на вищу швидкість він зменшується у два рази. А допустимий момент двигуна для $p=2$ і для $p=1$ за схемою **в** один і той же. Значить, при переході від меншої швидкості до більшої у цьому випадку допустимий момент не змінюється.

Найбільш уживані трифазні схеми обмотки статора при перемиканні на різне p наступні.

Перехід від $p=2$ до $p=1$ з постійною потужністю (момент зменшується вдвоє) здійснюється за такими схемами з'єднання фазних обмоток:

зірка – зірка (Y/Y), рисунок 4.28;

трикутник – подвійна зірка (Δ/Y Y), рисунок 4.29.



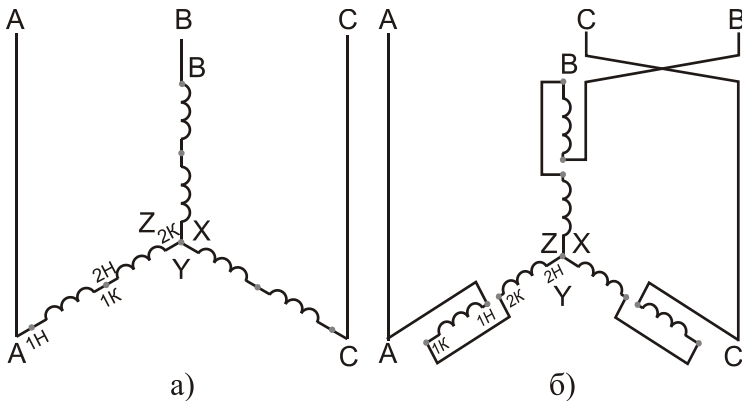
а – зірка (Y), $p=2$;

б – зірка (Y), $p=1$.

Рисунок 4.28 – Схема на послідовне перемикання обмоток.

У схемі, рисунок 4.28, перехід від узгоджено-послідовного з'єднання секцій (1Н – 1К, 2Н – 2К) у фазах зірки (фрагмент **а**) до зустрічно-послідовного їх з'єднання (1Н – 1К, 2К – 2Н) у фазах зірки

(фрагмент **б**) здійснюється у відповідності до схем рисунка 4.27 (фрагменти **а** й **б**).



а – трикутник (Δ), $p = 2$;

б – подвійна зірка (YY), $p = 1$.

Рисунок 4.29 – Схема на паралельне перемикання обмоток.

У схемі, рисунок 4.29, перехід від узгоджено-послідовного з'єднання секцій (1Н – 1К, 2Н – 2К) у фазах трикутника (фрагмент **а**) до зустрічно-паралельного їх з'єднання (1Н, 2К – 1К, 2Н) у фазах подвійної зірки (фрагмент **б**) здійснюється у відповідності до схем рисунка 4.27 (фрагменти **а** й **в**).

Механічні характеристики двошвидкісного АД для схем рисунка 4.28 (Y/Y) та рисунка 4.29 (Δ /YY) за умов регулювання швидкості з постійною потужністю

$$\begin{aligned} D_{a\pi\pi}(\delta=1) &= D_{a\pi\pi}(\delta=2), \\ \dot{I}_{i\delta}(\delta=1) &= 0,5 \dot{I}_{i\delta}(\delta=2), \end{aligned}$$

наведені на рисунку 4.30.

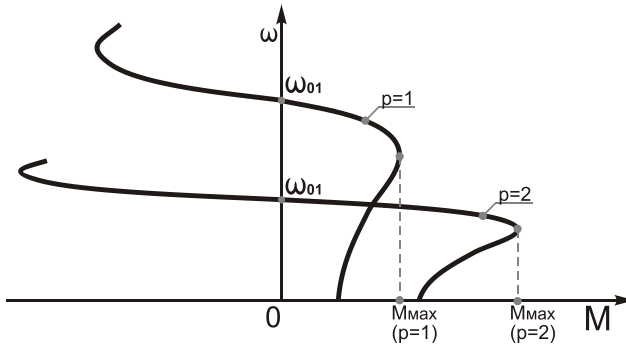
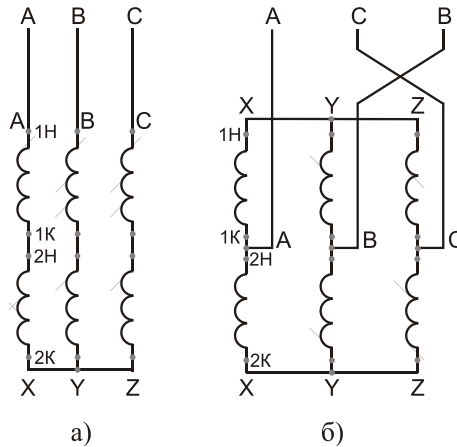


Рисунок 4.30 – Механічні характеристики двошвидкісного АД для схем Y/Y та Δ/YY.

Перехід від $p = 2$ до $p = 1$ з постійним допустимим моментом (потужність збільшується удвоє) здійснюється, наприклад, за схемами з'єднання фазних обмоток Y/YY, рисунок 4.31.



а – зірка (Y), $p = 2$;

б – подвійна зірка (YY), $p = 1$.

Рисунок 4.31 – Схема на паралельне перемикання обмоток.

Механічні характеристики двошвидкісного АД для схем рисунка 4.31 (Y/Y) за умов регулювання швидкості з постійним моментом (наведені на рисунку 4.32.)

$$\dot{I}_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}}(p=1) = \dot{I}_{\dot{\alpha}\dot{\sigma}}(p=2),$$

$$2D_{d\dot{\pi}}(\delta=1) = D_{d\dot{\pi}}(\delta=2)$$

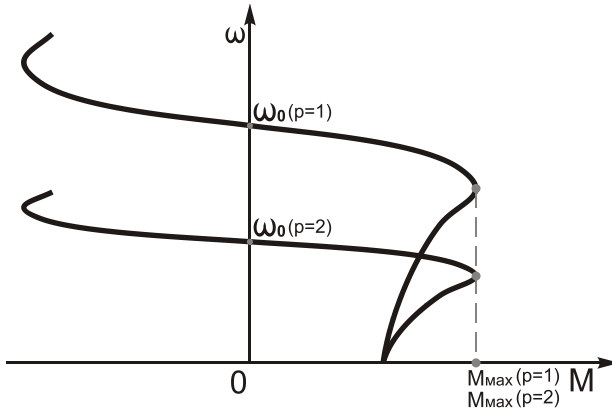


Рисунок 4.32 – Механічні характеристики двошвидкісного АД для схем Y/Y.

Із багатошвидкісних АД найбільший діапазон регулювання може бути $D=8:1$ або $D=6:1$, наприклад, для чотиришвидкісних АД співвідношення синхронних частот обертання може бути, [об/хв]:

- діапазон $D=8:1$ (3000/1500/750/375);
- діапазон $D=6:1$ (3000/1500/1000/500).

4.5.4 Регулювання координат АД змінюванням напруги живлення статора

Одним з можливих способів регулювання координат АД є змінювання напруги живлення обмотки статора без змінювання частоти.

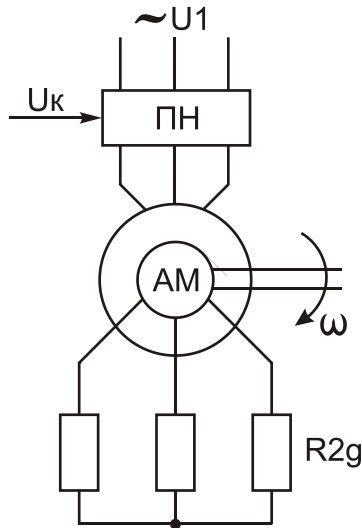


Рисунок 4.34 – Схема живлення АД з регулятором напруги.

При такому регулюванні синхронна кутова швидкість та критичне ковзання залишаються незмінними при зменшенні напруги, жорсткість механічних характеристик падає. Це не кращий спосіб регулювання швидкості, бо зі зменшенням напруги діапазон регулювання змінюється мало, проте суттєво зменшуються максимальний та поточний моменти двигуна (з огляду на те, що $M \equiv U^2$), а отже і його перевантажувальна здатність (дивись штучні характеристики 1-3, рисунок 4.35), натомість цей спосіб більш доцільний при регулюванні інших координат АД, наприклад, моменту і струму.

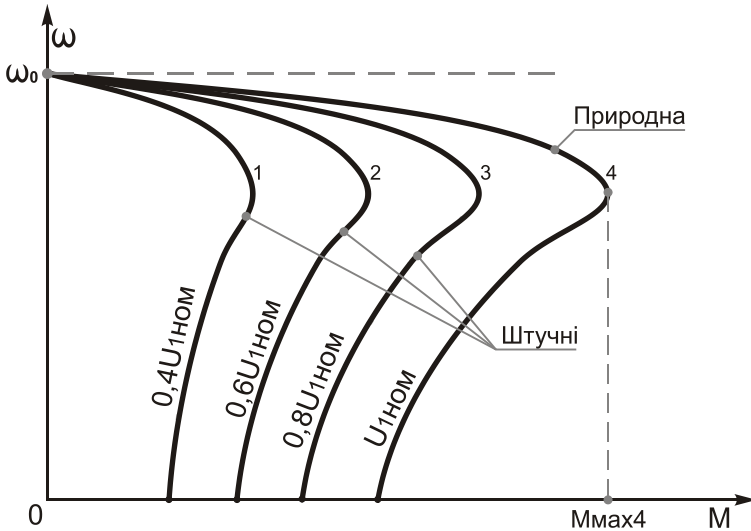


Рисунок 4.35 – Механічні характеристики АД при зменшенні напруги живлення.

4.5.5 Частотне регулювання АД

Частотний спосіб регулювання швидкості АД у різних його різновидах є одним із найрозповсюджених. Суть способу витікає з відомої залежності для синхронної швидкості

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

Цей спосіб має найкращі показники регулювання швидкості порівняно з іншими способами. Єдиним стримуючим фактором тут є висока вартість перетворювача частоти живлення. Частотний спосіб має таку важливу властивість як сталість ковзання при регулювання швидкості (цього немає при реостатному регулювання). За цієї обставини втрати ковзання ($\Delta P_2 = P_1 \cdot s$) незначні, тобто спосіб економічний.

Якщо при виборі співвідношення між f_1 та U_1 виходити з міркувань підтримки постійності моменту навантаження при регулювання швидкості, то при цьому слід зберігати незмінним магнітний потік.

Із формули Капа (визначає величину ЕРС для гармонічного закону змінювання струму)

$$E_1(U_1) = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot w_1 \cdot k_0,$$

де f_1 – частота змінного струму;

Φ – магнітний потік;

w_1 – число витків обмотки статора;

$k_0 = k_p \cdot k_y \cdot k_2$ – обмоточний коефіцієнт;

U_1 – фазна напруга,

випливає закон змінювання напруги й частоти

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{Const} \text{ (формула Костенка).}$$

Для механізмів третього класу (з вентиляторним моментом навантаження) цей закон має бути

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{Const}.$$

Для механізмів четвертого класу (M_c зменшується нелінійно при збільшенні швидкості) цей закон має бути

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{Const}.$$

Механічні характеристики АД для закону регулювання $\frac{U_1}{f_1} = \text{Const}$ подані на рисунку 4.36.

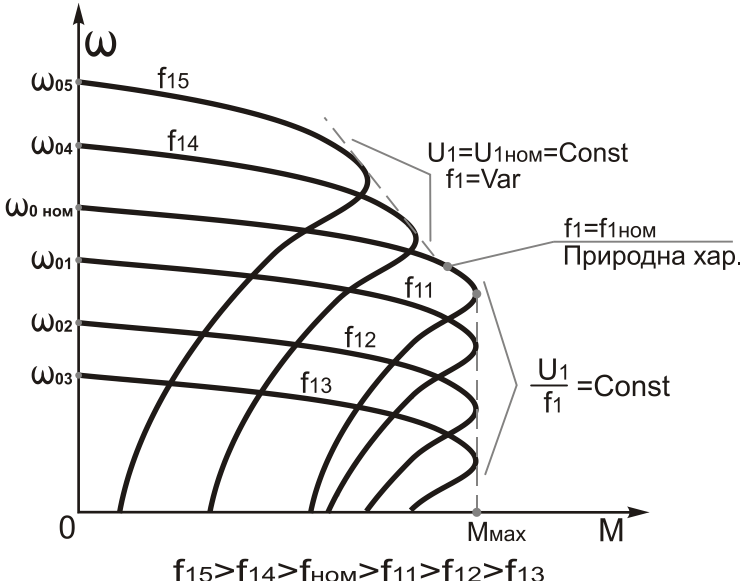


Рисунок 4.36 – Механічні характеристики АД при частотному регулюванні.

Для частот регулювання $f_1 \leq f_{ном}$ максимальний момент M_{max} практично постійний (збереження високої перевантажувальної здатності $\lambda_m = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$).

Для частот регулювання $f_1 > f_{ном}$, коли напруга U_1 не можна збільшуватись із-за насичення магнітної системи і практично залишається незмінною, рівною $U_{1ном}$, максимальний момент двигуна знижується.

Зауваження. Вищенаведені висновки одержані у знехтуванні активних опором обмотки статора. Це припущення не зовсім коректне при малих частотах, коли зменшується індуктивний опір і зростає відносний активний опір. Падіння напруги на ньому потребує зменшення напруги у меншій мірі, ніж це вимагає співвідношення $\frac{U_1}{f_1} = Const$.

Різні види перетворювачів частоти можна поділити на дві групи:

- статичні перетворювачі, які мають найбільш широке застосування;
- електромеханічні перетворювачі на базі звичайних, або спеціальних електричних машин.

Статичні перетворювачі частоти (СПЧ)

Сучасні СПЧ с мікропроцесорним керуванням, високим ККД та великою швидкодією – це основні чинники запровадження силових СПЧ.

СПЧ можна поділити на дві групи:

- перетворювачі з безпосереднім зв'язком мережі живлення й навантаження;
- перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму.

Перетворювачі з безпосереднім зв'язком

Такі СПЧ використовуються для живлення АД на низьких частотах (≈ 10 Гц) та нижче при промисловій частоті 50 Гц.

Принцип дії на прикладі фази A . Величина вихідної напруги $U_{2\phi}$ й частота f_2 залежать від режиму роботи двох груп тиристорів $VS1-VS3$ та $VS1-VS6$.

Час t_0 - пауза проміж вимиканням однієї тиристорної групи й вмиканням другої. Вона може регулюватися й може дорівнювати нулю:

$t_0 = 0$ – дискретне регулювання,

$t_0 \neq 0$ – плавне регулювання.

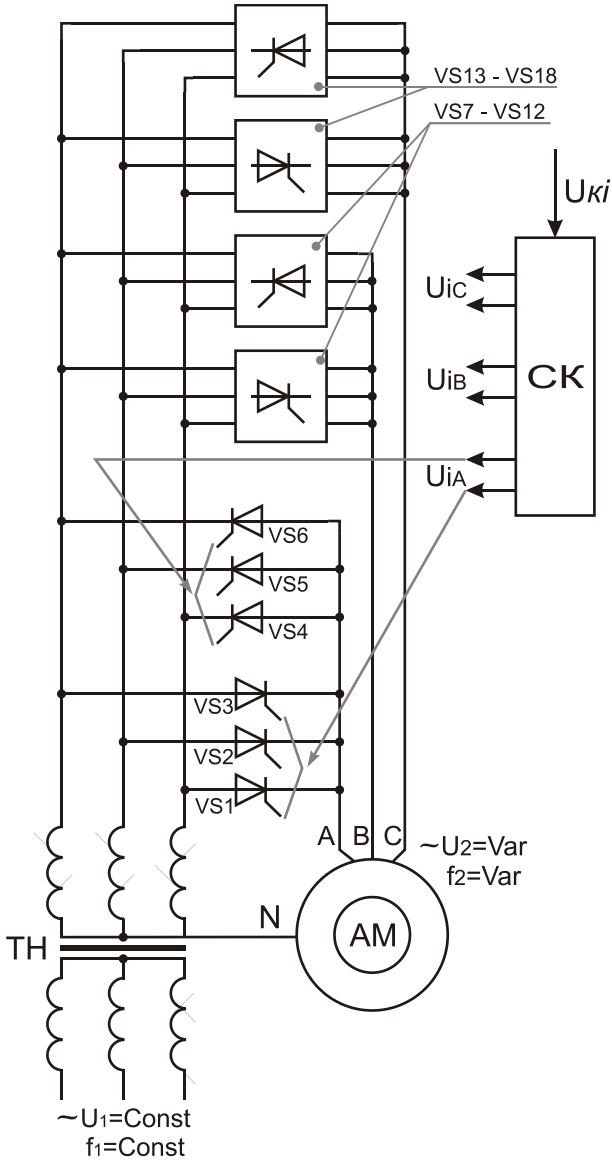


Рисунок 4.38 – Спрощена схема перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком мережі живлення й навантаження.

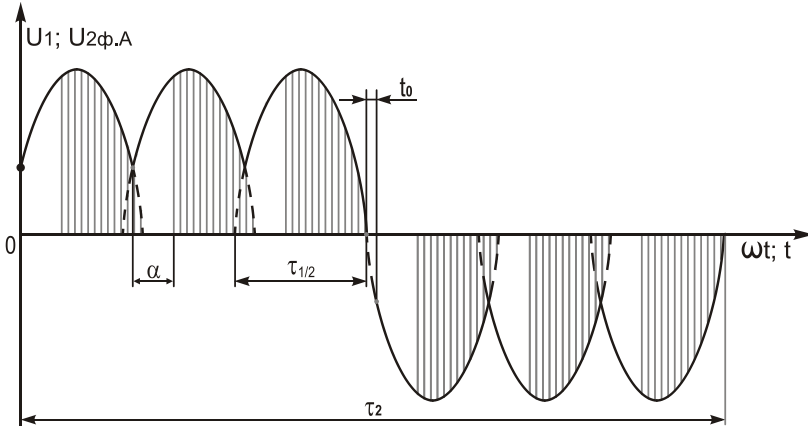


Рисунок 4.39 – Отримання вихідної напруги U_2 фази А при трифазній вхідній напрузі U_1 .

$U_{2\phi A}$ регулюється величиною кута керування α .

Отримання на навантаженні трифазної вихідної напруги зі зсувом фаз на третину періоду досягається тим, що керуючі імпульси на тиристорних групах U_{iA} , U_{iB} , U_{iC} подаються зі зсувом на третину періоду вихідної напруги у відповідності з сигналами керування $U_{\kappa i}$, рисунок 4.38.

Певним недоліком схеми є наявність на навантаженні нульового проводу N , та обмежений діапазон регулювання.

Перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму

Силову частину такого перетворювача являє собою послідовно увімкнені статичний перетворювач змінного струму у постійний $П1$ й статичний перетворювач постійного струму у змінний $П2$.

Перетворювач $П1$ являє собою керований випрямляч KB , величина випрямленої напруги $U_{\text{в}}$ якого регулюється шляхом змінювання кута керування α тиристорів випрямляча KB за допомогою системи керування $СКKB$.

Перетворювач $П2$ являє собою керований інвертор $КІ$, частота вихідної змінної напруги U_2 якого регулюється шляхом змінювання частоти комутації f_k тиристорів інвертора $КІ$ за допомогою системи керування $СККІ$ (рисунок 4.40).

Керуючі сигнали $U_{\hat{e}\hat{a}}$ й $U_{\hat{e}\hat{b}}$ подаються у відповідні системи керування від задаючого пристрою $ЗП$.

Таким чином амплітуда напруги $\sim U_2$ регулюється на $КВ$, а частота f_2 – на $КІ$.

Принцип дії $КВ$ був розглянутий при вивченні статичних перетворювачів для живлення ДПС від мережі змінного струму (пункт 4.3.4).

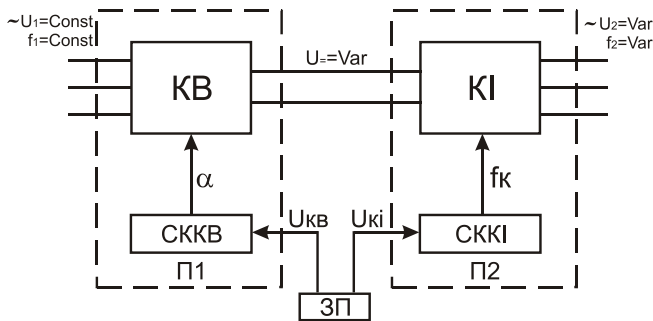
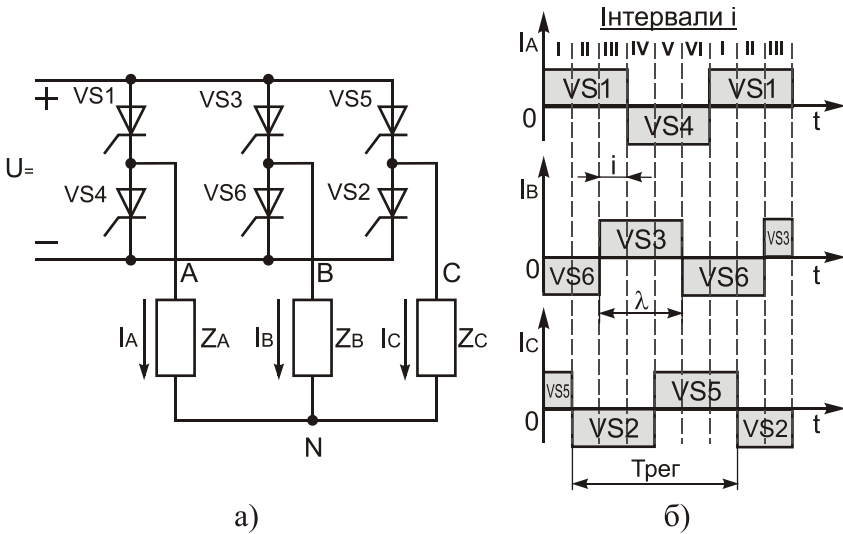


Рисунок 4.40 – Структурна схема СПЧ з проміжною ланкою постійного струму.

Принцип одержання регульованої частоти f_2 можна пояснити на схемі, яка складається з трифазного навантаження Z , з'єднаного у зірку, та шести тиристорів $VS1-VS6$, з'єднаних у мостову схему, фрагмент **а** рисунка 4.41.

За допомогою системи керування інверторами $СККІ$ ці тиристори можуть відкриватися у необхідній послідовності й на будь-який відрізок часу.

При інвертуванні найчастіше використовують тривалість відкритого стану тиристора λ на половину ($\lambda = \frac{T_{pez}}{2}$), або на третину ($\lambda = \frac{T_{pez}}{3}$) періоду T_{pez} регульовної частоти f_2 , фрагмент **б** рисунка 4.41.



а – схема;

б – часові струмові діаграми.

Рисунок 4.41 – До пояснень принципу одержання регульовної частоти інвертора.

У наведеному фрагменті $\lambda = \frac{T_{pez}}{2}$.

Зсув моменту відкриття тиристорів VS1 – VS6 складає шосту частину періоду регульовної частоти

$$i_I + i_{II} + i_{III} + i_{IV} + i_V + i_{VI} = T_{pez},$$

тобто інтервал між моментами відкриття тиристорів складає

$$i_i = \frac{T_{peg}}{6}.$$

Часові струмові діаграми роботи тиристорів (рисунок 4.41 б) наведені для трьох фаз навантаження. Тут струми фаз I_A , I_B , I_C , які проходять через непарні тиристори VS1, VS3, VS5 відкладені у додатному напрямку, а через парні тиристори VS2, VS4, VS6 – у від'ємному.

У залежності від способу комутації струмів тиристорів інвертори поділяються на два типи:

- інвертори ведені мережею;
- автономні інвертори.

В інверторах ведених мережею комутація струму з вентиля на вентиль забезпечується природною комутацією.

В автономних інверторах комутація струму з вентиля на вентиль здійснюється додатковими елементами – примусова (штучна комутація).

Автономні інвертори поділяються на: автономні інвертори напруги (АІН); автономні інвертори струму (АІС).

АІН мають джерело живлення – джерело напруги.

АІС мають властивості джерела струму, для чого їх живлення здійснюється від джерела струму.

На рисунку 4.42 тиристори VS7–VS12 утворюють керований випрямляч KB. На виході KB підімкнений реактор згладжувального фільтра L_0 . на виході KB також підімкнений конденсатор C_0 , який разом з діодами V7–V12 забезпечують циркуляцію реактивної потужності.

Тиристори VS1–VS6 призначені для інвертування напруги змінного струму регульовної частоти. Конденсатори C1–C6 та індуктивності L1–L6 разом з VD1–VD6 утворюють кола штучної комутації, які забезпечують закриття основних тиристорів VS1–VS6 в необхідний момент.

Для одержання якісних статичних і динамічних характеристик АД у системі СПЧ використовуються різні зворотні зв'язки від двигуна (за швидкістю, магнітним потоком, струмом і інші).

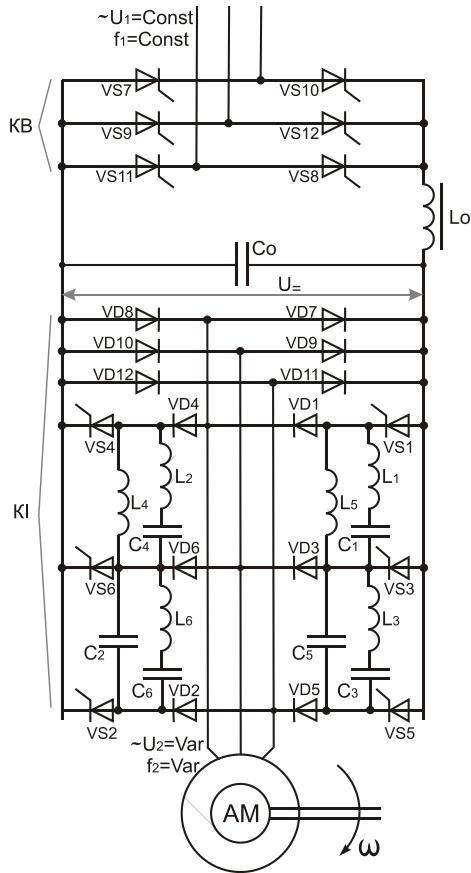


Рисунок 4.42 – Схема статичного перетворювача частоти з автономним інвертором напруги.

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.