

62-8
В 676

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія



О. В. Волков
І. О. Косенко

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

Навчально-методичний посібник

для студентів ЗДІА
напряму 6.050602 та спеціальності "Гідроенергетика"
денної та заочної форм навчання

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

*Затверджено до друку
рішенням науково-методичної ради ЗДІА
протокол № 4 від 23.06.2016р.*

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

Навчально-методичний посібник

*для студентів ЗДІА
напряму 6.050602 та спеціальності "Гідроенергетика"
денної та заочної форм навчання*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ГЕ,
протокол № 18 від 08.06.2016р.*

Запоріжжя
ЗДІА
2016

УДК 62-8
В 676

*О. В. Волков, д.т.н, професор
І. О. Косенко, к.т.н.*

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри ГЕ,
д.т.н., професор О. В. Волков*

Рецензенти:

С. М. Тиховод, д.т.н., доцент, завідувач кафедри загальної та теоретичної електротехніки Запорізького національного технічного університету;

М. Ю. Пазюк, д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Запорізької державної інженерної академії.

Волков О. В.

В 676 Автоматизований електропривод: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА напряму 6.050602 та спеціальності "Гідроенергетика" денної та заочної форм навчання / Волков О. В., Косенко І. О.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 174 с.

Даний навчально-методичний посібник призначено для вивчення лекційного курсу і проведення практичних занять, контрольних та самостійних робіт з дисципліни "Автоматизований електропривод" студентам напряму підготовки та спеціальності "Гідроенергетика" денної та заочної форм навчання.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП	7
1 ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	8
1.1 Загальні відомості об електроприводі (визначення, призначення та класифікація)	8
1.2 Основні типи електричних машин та їх умовні позначення	10
1.3 Коефіцієнт корисної дії електричної машини	11
1.4 Основні відомості про механіку електропривода	13
1.4.1 Рівняння руху електропривода (або основне рівняння електропривода)	13
1.4.2 Розрахунок статичних моментів (приведення моментів опору до валу двигуна)	15
1.4.3 Приведення до валу двигуна моментів інерції мас, що обертово та поступово рухаються	16
1.5 Види статичних моментів	18
1.5.1 Статичні моменти, які залежать від швидкості	18
1.5.2 Моменти опору, які залежать від кута повороту валу й шляху	20
1.5.3 Статичні моменти опору, які залежать від часу	21
1.6 Обмеження робочих координат електропривода та визначення сталих координат його роботи	22
1.6.1 Обмеження робочих координат електропривода	22
1.6.2 Визначення сталих значень робочих координат електропривода	23
1.7 Жорсткість статичних механічних характеристик двигуна й визначення стійкості роботи електропривода	25
1.7.1 Жорсткість статичних механічних характеристик електродвигуна	25
1.7.2 Визначення стійкості сталого режиму електропривода	26
1.8 Оптимізація передавального числа редуктора	29
1.9 Розрахунок перехідних механічних процесів електропривода	30
1.9.1 Ілюстрація аналітичного методу	30
1.9.2 Ілюстрація графо-аналітичного методу	33
2 ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	36
2.1 Основні математичні залежності для електричної машини постійного струму з незалежним збудженням	36
2.2 Статичні характеристики електричної машини постійного струму незалежного збудження	37
2.2.1 Магнітна характеристика	38
2.2.2 Зовнішня статична характеристика генератора незалежного збудження	38

2.2.3 Статичні механічні характеристики двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням	41
2.2.4 Способи регулювання швидкості ДПС незалежного збудження при незмінній якірній напрузі	42
2.2.5 Регулювання швидкості ДПС незалежного збудження шляхом зміни якірної напруги	46
2.3 Статичні механічні характеристики ДПС з послідовним та змішаним збудженням	48
2.3.1 СМХ двигуна постійного струму з послідовним збудженням	48
2.3.2 СМХ двигуна постійного струму зі змішаним збудженням	50
2.4 Електропривод постійного струму за системою “генератор-двигун”	52
2.5 Тиристорний електропривод постійного струму	56
2.6 Системи автоматичного керування тиристорними електроприводами постійного струму	59
2.6.1 Тиристорний електропривод постійного струму зі струмовою “відсічкою” (або підсумовуючим підсилювачем)	60
2.6.2 Тиристорний електропривод постійного струму з двоконтурною системою підпорядкованого однозонного регулювання швидкості	62
2.6.3 Тиристорний електропривод з зовнішнім контуром регулювання ЕРС двигуна	66
2.6.4 Тиристорний електропривод з системою підпорядкованого двозонного регулювання швидкості	67
2.6.5 Тиристорні електроприводи постійного струму з регулюванням положення	70
2.7 Релейно-контакторне керування електроприводами постійного струму	76
2.7.1 Загальні поняття	76
2.7.2 Спосіб пуску ДПС незалежного збудження шляхом перемикання ступенів додаткового резистора в ланцюзі обмотки якоря	79
2.7.3 Пуск ДПС незалежного збудження у функції часу	83
2.7.4 Пуск ДПС незалежного збудження у функції ЕРС	85
2.7.5 Пуск ДПС незалежного збудження в одну ступінь у функції струму	86
2.7.6 Динамічне гальмування двигуна постійного струму незалежного збудження	88
2.7.7 Гальмування противвімкненням ДПС незалежного збудження	93
2.8 Переваги та недоліки електропривода постійного струму, область застосування	101

3	ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ	103
3.1	Основні відомості об електроприводі змінного струму та способах керування двигунами змінного струму	103
3.2	Основні математичні залежності та статичні механічні характеристики для короткозамкненого асинхронного двигуна	104
3.3	Частотне керування короткозамкненим асинхронним двигуном	109
3.4	Фазове керування короткозамкненим асинхронним двигуном	114
3.5	Релейно-контакторне керування короткозамкненим асинхронним двигуном	119
3.5.1	Пуск короткозамкненого АД	119
3.5.2	Реверс короткозамкненого АД	121
3.5.3	Динамічне гальмування короткозамкненого АД	124
3.6	Керування асинхронним двигуном з фазним ротором	128
3.6.1	Основні залежності для побудови статичних механічних характеристик для АД з фазним ротором	128
3.6.2	Спосіб керування пуском АД з фазним ротором з вмиканням додаткових резисторів в обмотки ротора	130
3.7	Керування синхронним двигуном	132
3.7.1	Частотне керування СД	132
3.7.2	Релейно-контакторне керування пуском СД	133
4	ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ, РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ДВИГУНА	138
4.1	Енергетика електроприводів	138
4.1.1	Коефіцієнт корисної дії електропривода	138
4.1.2	Втрати потужності в нерегульованих електроприводах, що працюють в сталих режимах на природній механічній характеристиці двигуна	139
4.1.3	Електромеханічні характеристики електричних машин	142
4.1.4	Втрати потужності в сталих режимах для регульованих за швидкістю електроприводів постійного струму	144
4.1.5	Втрати потужності в сталих режимах регульованих за швидкістю асинхронних електроприводів	147
4.1.6	Втрати енергії в динамічних режимах нерегульованих за швидкістю електроприводів	150
4.1.7	Втрати енергії в динамічних режимах регульованих за швидкістю електроприводів	156
4.2	Вибір типу електродвигуна, розрахунок його потужності і перевірка на нагрів	159
4.2.1	Вибір типу електродвигуна	159
4.2.2	Розрахунок потужності і перевірка на нагрів двигунів, що працюють в сталих режимах з швидкістю, близькою до номінальної	162

4.2.3 Розрахунок потужності і перевірка на нагрів регульованих за швидкістю двигунів	167
4.2.4 Визначення припустимого числа включень асинхронних короткозамкнених двигунів	171
ДЖЕРЕЛА ВИКОРИСТАННОЇ ЛІТЕРАТУРИ	174

ВСТУП

Інтенсивний розвиток виробничих сил, який відбувся в світі в XX столітті, в багатьом зобов'язаний широкому впровадженню автоматизованого електропривода у всіх галузях господарства (металургії, горно добувної та хімічної промисловості, машинобудуванні, енергетики, в комунальному господарстві, в електротранспорті та ін.). Це забезпечило суттєве підвищення продуктивності праці, широку автоматизацію технологічних процесів, виключення людини з більшості виробничих процесів (в тому числі при впровадженні робототехніки). За минуле століття електричний привод пройшов стрімкий шлях свого розвитку: від некерованих електроприводів постійного та змінного струму – до сучасних швидкодіючих та економічних тиристорних електроприводів постійного струму та частотно-регульованих електроприводів змінного струму, створених на основі останніх наукових та технічних досягнень сигової електроніки та перетворювальної техніки, автоматичного керування з використанням мікропроцесорної апаратної бази.

З урахуванням значного прогресу в розвитку автоматизованого електропривода, на стан якого впливають успіхи в розвитку багатьох інших галузей та сфер науково-технічної діяльності (в електромашинобудуванні, силовій та перетворювальній техніці, мікроелектроніці, автоматичному керуванні та його апаратній базі), стала актуальною та важливою задачею систематизувати накопичені знання про автоматизований електропривод та найбільш затребувані з цих знань логічно викласти в навчально-методичному посібнику з сучасного автоматизованого електропривода.

Початковою навчальною підготовкою при користуванні цим навчально-методичним посібником є попереднє вивчення навчальних дисциплін: „Електромеханіка” або „Електричні машини”. Запропонований навчально-методичний посібник рекомендується студентам денної та заочної форм навчання наряду та спеціальності „Гідроенергетика”, а також може бути корисним для студентів інших електромеханічних спеціальностей та інженерно-технічним робітникам, які займаються проектуванням та експлуатацією автоматизованих електроприводів в гідроенергетиці та промисловості.

В даному посібнику автори постаралися доступно викласти основні відомості з теорії електропривода (в розділі 1), керування та автоматизації сучасних електроприводів постійного (в розділі 2) і змінного (в розділі 3) струму, а також достатньо докладно (з метою подальшого використання при курсовому проектуванні автоматизованих електроприводів) привели аналітичні залежності для розрахунку втрат потужності та енергії в електроприводах, вибору електродвигуна і перевірки його за нагрівом (в розділі 4).

1 ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1.1 Загальні відомості об електроприводі (визначення, призначення та класифікація)

Електропривод (ЕП) – це електромеханічна система, яка складається з: електричного двигуна, релейно-контакторної схеми (або перетворювача), передавального та керуючого пристроїв. В окремих (рідкісних) випадках в цій системі можуть бути відсутнім передавальний пристрій (коли кутова частота обертання ротору дорівнює кутовій частоті обертання виконуючого органу – наприклад, як в мотор-колесі).

Електропривод призначений для приведення у рух виконавчих органів робочої машини та керування цим рухом.

Автоматизований ЕП – це електропривод, в якому частина регулювання здійснюється автоматично (тобто – без участі оператора). Якщо ж регулювання в ЕП здійснюється повністю без участі оператора, то це регулювання називається автоматичним.

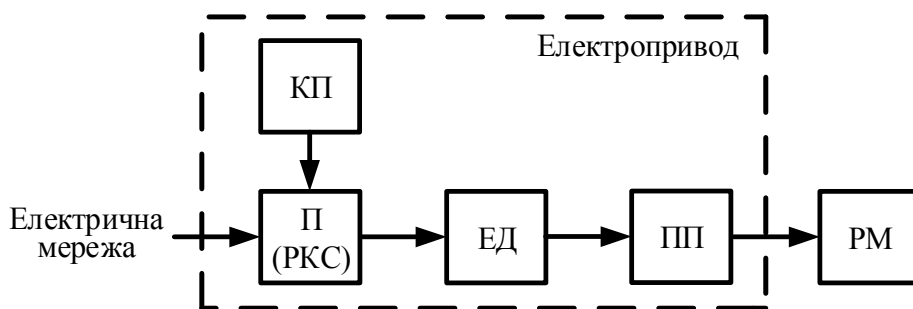


Рис.1.1 Блок-схема електропривода (П – перетворювач; РКС – релейно-контакторна схема; ЕД – електричний двигун; ПП – передавальний пристрій; РМ – робоча машина; КП – керуючий пристрій).

В якості *передавального пристрою (ПП)* можуть бути використаними: механічний редуктор, ремінна або ланцюгова передача, рейкова передача, кривошипно-шатунна передача.

Невід’ємною частиною електропривода є *електричний двигун* (або, як його ще часто називають, *електрична машина*). В залежності від типу застосованої в ньому електричної машини (постійного або змінного струму) електропривод називається відповідно електроприводом постійного або змінного струму.

Існує наступна класифікація електроприводів.

1. *За засобом передачі* механічної енергії до робочої машини ЕП поділяються на:

- *індивідуальний* – це ЕП, у якому кожний виконавчий орган робочої машини приводиться в дію своїм окремим двигуном (у наш час індивідуальний привод є найбільш поширеним);
- *взаємопов’язаний* – це ЕП, що містить два або більше електрично чи механічно пов’язанні між собою електроприводи; окремим випадком

взаємопов'язаного електропривода є *багатодвигуневий електропривод*, при якому декілька двигунів працюють на спільний вал та приводять у рух один виконавчий орган робочої машини;

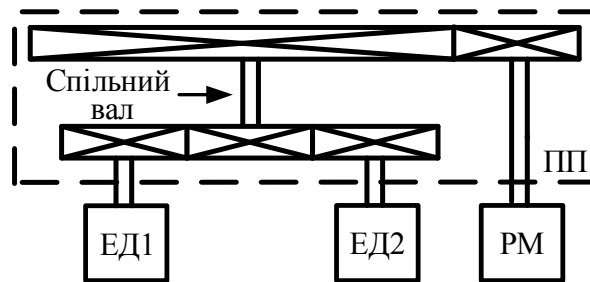


Рис.1.2 Кінематична схема багатодвигуневого електропривода.

- *груповий* – це ЕП, який характеризується тим, що один двигун приводить у дію два або декілька виконавчих органів робочої машини (РМ); така система має ускладнений кінематичний ланцюг (трансмісію) і не дозволяє роздільне регулювання швидкості окремих виконавчих органів.

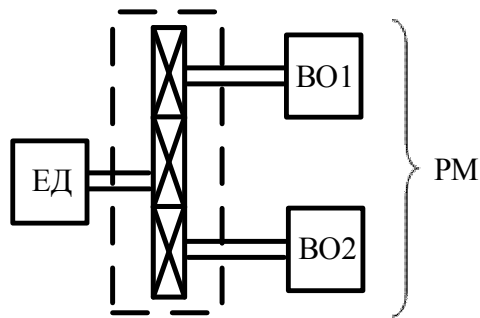


Рис.1.3 Кінематична схема групового електропривода

2. За типом руху:

- з обертальним та поступальним рухом РМ;
- зі зворотно-поступальним рухом РМ;
- з нереверсивним (однонаправленим за швидкістю) або реверсивним (двонаправленим за швидкістю) рухом.

3. За типом параметра, що регулюється:

- з регулюванням швидкості;
- з регулюванням положення;
- з регулювання інших параметрів (тиску, натягу, рівня та інше).

4. За характером зміння регульованих параметрів:

- нерегульований, тобто працюючий при близький до номінальної незмінній швидкості;
- системи стабілізації, в яких здійснюється підтримка параметрів, що регулюються на незмінному рівні;
- з програмним керуванням, в цих ЕП зміння параметрів відбувається за заданою програмою;

- сліdkуючий електропривод – це ЕП в якому змінення параметрів відбувається за довільною та заздалегідь невідомою програмою;
- позиційний ЕП, що характеризується зміненням положення з одного фіксованого стану в інший фіксований стан.

Контрольні питання

1. Електропривод (визначення, призначення, загальна схема, призначення основних елементів електропривода).
2. Класифікація електроприводів за способом передачі механічної енергії.
3. Класифікація електроприводів за видом руху.
4. Класифікація електроприводів за характером зміни регульованих параметрів електропривода.

1.2 Основні типи електричних машин та їх умовні позначення

Найбільше розповсюдження у теперішній час знайшли наступні *типи електричних машин*:

- постійного струму;
- асинхронні з фазним ротором;
- асинхронні з короткозамкненим ротором;
- синхронні.

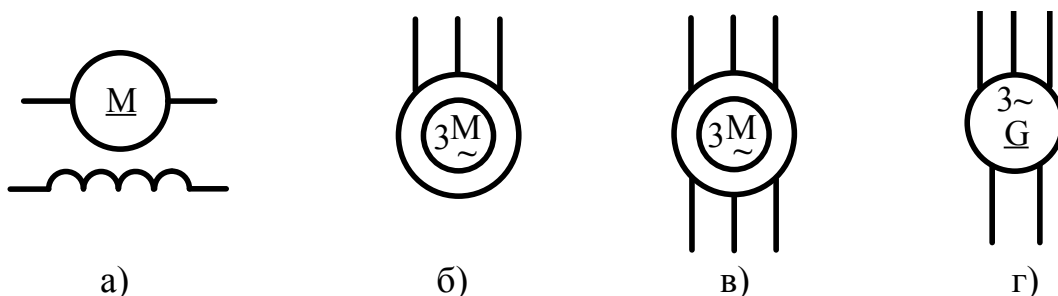


Рис.1.4. Умовні графічні позначення електричних машин: а – машина постійного струму (МПТ) з незалежним збудженням; б – асинхронна машина з короткозамкненим ротором (АМ кр); в – асинхронна машина з фазним ротором (АМ фр); г – синхронна машина (СМ)

Важлива особливість усіх типів електричних машин (ЕМ) полягає у їх властивості взаємо-зворотного перетворення енергії: з електричної у механічну або механічної в електричну.

У першому випадку (при перетворенні електричної енергії, яка споживається з електричної мережі, у механічну енергію), електрична машина працює у двигуновому режимі, при якому споживається активна енергія з мережі і створюється двигуновий обертальний момент машини ($M > 0$), а робота відбувається у I й III квадрантах механічної діаграми $\omega(M)$, яка показана

на рис.1.5 Даний режим роботи ЕМ називається двигуневим та позначений на діаграмі буквою “Д”.

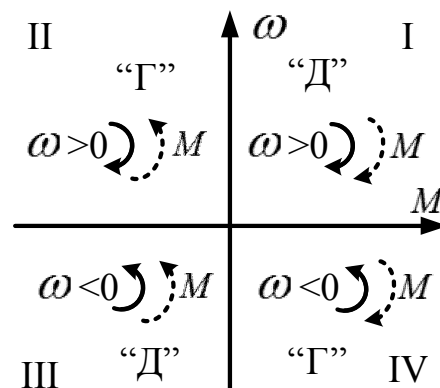


Рис.1.5. Механічна діаграма роботи електричної машини

При перетворенні механічної енергії в електричну ЕМ працює у генераторному (гальмівному) режимі, повертаючи кінетичну енергію ротора ЕМ у вигляді електричної енергії в мережу живлення. При цьому ЕМ створює гальмівний режим роботи ($M < 0$) та працює у II й IV квадрантах механічної діаграми. Даний режим роботи ЕМ називається гальмівним (генераторним) та позначений на діаграмі буквою “Г”.

На розглядуваній діаграмі стрілками показані напрямки: суцільною лінією – частоти обертання ω ротору машини, а пунктирною лінією – дія обертового моменту M машини.

Контрольні питання

1. Основні типи електроприводів та електричних машин.
2. Умовні графічні позначення електричних машин.
3. Сутність двигуневого та генераторного режимів роботи електричних машин. В яких квадрантах механічної діаграми привода вони реалізуються?

1.3 Коефіцієнт корисної дії електричної машини

Коефіцієнт корисної дії (ККД) для двигуневого режиму електричної машини розраховується наступним чином:

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum \Delta P}{P_1} < 1, \quad (1.1)$$

де P_2 – корисна механічна потужність на валу;

P_1 – електрична потужність, що споживається з мережі;

$\sum \Delta P$ – сума усіх втрат потужності у машині (електричних, магнітних в сталі, механічних).

Для генераторного режиму електричної машини співвідношення для розрахунку ККД має вигляд:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_1}{P_M} = \frac{P_M - \sum \Delta P}{P_M} < 1, \quad (1.2)$$

де P_M – механічна потужність на валу ЕМ;

P_1 – корисна електрична потужність, що передається до електричної мережі або електроспоживача;

$\sum \Delta P$ – сума усіх втрат потужності у машині (електричних, магнітних в сталі, механічних).

При цьому значення номінального ККД η_H (зазначене в паспортних даних ЕМ) відповідає номінальній швидкості та номінальному навантаженню (тобто номінальній корисній потужності) і дорівнює номінальному ККД η_{HD} в двигуновому режимі (і також приблизно – номінальному ККД η_{HG} в генераторному режимі роботи ЕМ):

$$\eta_H = \eta_{HD} \approx \eta_{HG} \approx 0,8 - 0,95, \quad (1.3)$$

де більші значення ККД належать до ЕМ більшої потужності (більше 100кВт), а менші значення – до ЕМ малої потужності (рівної 1кВт).

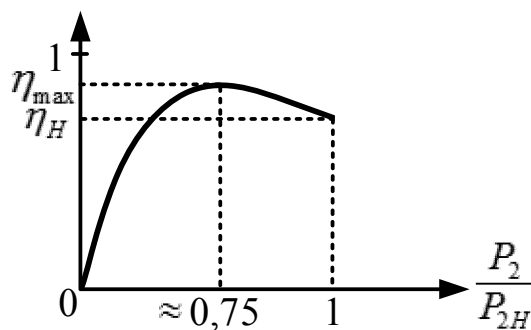


Рис.1.6 Залежність ККД від кратності потужності (навантаження) ЕМ

На рис.1.6 кратність корисної потужності P_2 взята по відношенню до номінальної корисної потужності P_{2H} , яка досягається при номінальній швидкості ω_H та номінальному моменті навантаження M_H машини.

Контрольні питання

1. Розрахункова залежність для коефіцієнта корисної дії електричної машини.
2. Номінальне значення коефіцієнта корисної дії електричної машини та в якому чисельному діапазоні знаходяться ці значення для електричних машин потужністю вище 1 кВт?
3. Графічна залежність зміни коефіцієнта корисної дії електричної машини від значення вихідної (корисної) потужності машини.

1.4 Основні відомості про механіку електропривода

1.4.1 Рівняння руху електропривода (або основне рівняння електропривода).

Для приведення у рух будь-якого виконавчого механізму (виконавчого органу робочої машини) до нього необхідно прикласти рушійну силу, що буде переборювати сили опору, які діють на зазначений механізм.

Залежності між силами опору та рушійними силами виражаються наступними рівняннями (які відомі з теоретичної механіки):

$$F - F_o = am = \frac{dv}{dt} m - \quad (1.4)$$

при поступальному русі, або:

$$M - M_o = J\xi = J \frac{d\omega}{dt} - \quad (1.5)$$

при обертальному русі.

У формулах (15) і (16) використовуються наступні позначення:

F [Н] – рушійна сила;

F_o [Н] – сила опору;

m [кг] – маса тіла, яке поступово рухається;

$a = \frac{dv}{dt} \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$ – лінійне прискорення;

$v \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$ – лінійна швидкість;

M [Н·м] – обертовий момент;

M_o [Н·м] – момент опору (або момент навантаження);

J [кг·м²] – момент інерції тіла, що обертається;

$\xi = \frac{d\omega}{dt} \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right]$ – кутове прискорення;

$\omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$ – кутова частота обертання тіла, що обертається.

Для циліндричної форми тіла, що обертається, момент інерції J визначається із співвідношення:

$$J = m\rho^2, \quad (1.6)$$

де m [кг] – маса тіла;

ρ [м] – радіус циліндра.

Якщо в рівнянні (1.6) виконати заміну:

$$\left. \begin{aligned} m &= G/g, \\ \rho &= D/2 \end{aligned} \right\}, \quad (1.7)$$

то отримаємо інше співвідношення для моменту інерції циліндра, що обертається, у наступному вигляді:

$$J = \frac{GD^2}{4g}, \quad (1.8)$$

де GD^2 [Н·м²] – маховий момент;

D [м] – діаметр циліндру;

G [Н] – вага циліндру;

Числові значення махового моменту GD^2 або моменту інерції J наводяться у довідковій літературі для різних форм тіл, що обертаються (наприклад, куля, куб, паралелепіпед та інше). Причому, маховий момент GD^2 наводиться у старих довідниках у розмірності “кілограм сили” [кГ·м²], а момент інерції J подається у новій довідковій літературі (яка відповідає системі вимірювання СІ) у розмірності [кг·м²]. Якщо маховий момент GD^2 наводиться з розмірністю [кГ·м²], то формула (1.8) приймає наступний вигляд:

$$J = \frac{GD^2}{4}. \quad (1.9)$$

В електроприводі для зручності прийнято (виходячи з того, що вал двигуна завжди обертається) приводити значення моменту опору та моменту інерції робочого механізму до валу двигуна.

З врахуванням приведення вище згаданих величин до валу двигуна та співвідношення (1.5) для обертального руху отримаємо наступне рівняння:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.10)$$

яке називається основним рівнянням руху електроприводу. У даному рівнянні прийняті наступні позначення:

M [Н·м] – обертальний момент ЕМ;

M_c [Н·м] – приведений до валу двигуна момент опору (або статичний момент) робочої машини;

$\omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$ – кутова частота обертання валу ЕМ;

J [кг·м²] – сумарний (двигуна, передавального пристрою та робочої машини) приведений (до валу двигуна) момент інерції привода.

Різниця між обертальним моментом M електричної машини та статичним моментом M_c :

$$M - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.11)$$

називається *динамічним моментом привода*.

З аналізу (21) виходить, що:

1) якщо $M_{\text{дин}} = M - M_c > 0$, то похідна $\frac{d\omega}{dt} > 0$ та швидкість електропривода збільшується (відбувається при $\omega > 0$ режим розгону, а при $\omega < 0$ – режим гальмування);

2) якщо $M_{\text{дин}} = M - M_c < 0$, то похідна $\frac{d\omega}{dt} < 0$ та швидкість електропривода зменшується (відбувається при $\omega < 0$ режим розгону, а при $\omega > 0$ – режим гальмування);

3) якщо $M_{\text{дин}} = M - M_c = 0$, то похідна $\frac{d\omega}{dt} = 0$ та рух електропривода є рівномірним ($\omega = \text{const}$) або привод знаходиться в зупиненому стані ($\omega = 0$).

1.4.2 Розрахунок статичних моментів (приведення моментів опору до валу двигуна)

Визначення статичних моментів необхідно для використання основного рівняння (1.10) руху електропривода.

Розглянемо приведення моментів опору до валу двигуна на прикладі кінематичної схеми електропривода механізму підйому крана, яка показана на рис.1.7.

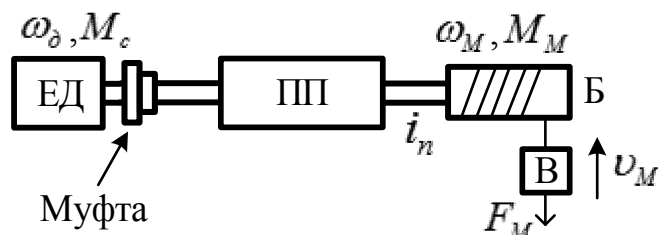


Рис.1.7. Кінематична схема механізму підйому крана (ЕД – електродвигун; ПП – передавальний пристрій; Б – барабан, на який намотується трос; В – вантаж).

На схемі рис.1.7 прийняті наступні позначення: ω_∂ й M_c – кутова частота обертання й статичний момент; ω_M – кутова частота обертання на виході редуктора (тобто на барабані); M_M – момент опору механізму (на валу барабану); v_M – лінійна швидкість руху вантажу; F_M – сила, що діє на вантаж (сила тяжіння); i_n – передавальне число передавального пристрою, що розраховується із залежності :

$$i_n = \frac{\omega_\partial}{\omega_M}. \quad (1.12)$$

Знаходження значення статичного моменту (тобто моменту опору, приведенного до валу двигуна) виконується, виходячи з умови балансу статичних потужностей на валу механізму й валу двигуна. Спочатку складемо такий баланс потужностей для механізмів з обертовим рухом (цим механізмом на кінематичній схемі на рис.1.7 є барабан Б):

$$\frac{P_M}{\eta_n} = \frac{M_M \cdot \omega_M}{\eta_n} = P_\partial = M_c \cdot \omega_\partial, \quad (1.13)$$

де η_n – ККД передавального пристрою (при передачі потужності від двигуна до барабану);

$P_M = \eta_n \cdot P_\partial$ – потужність на валу барабана.

З останнього співвідношення з врахуванням (1.12) визначимо приведенне до валу двигуна значення статичного моменту M_c у вигляді:

$$M_c = \frac{M_M}{\eta_n} \cdot \frac{\omega_M}{\omega_\delta} = \frac{M_M}{\eta_n \cdot i_n}. \quad (1.14)$$

У випадку поступального руху виконавчого органу робочої машини (в кінематичній схемі на рис.1.7 поступальний рух здійснює вантаж В) баланс потужностей на валу двигуна й на виконавчому органі запишемо у вигляді:

$$\frac{P_M}{\eta'_n} = \frac{F_M \cdot v_M}{\eta'_n} = P_\delta = M_c \cdot \omega_\delta, \quad (1.15)$$

а значення статичного моменту (тобто приведенного моменту опору від дії вантажу до валу двигуна) знаходиться із співвідношення:

$$M_c = \frac{F_M}{\eta'_n} \cdot \frac{v_M}{\omega_\delta} = \frac{F_M \cdot v_M}{\eta_n \cdot \eta_\delta \cdot \omega_\delta}, \quad (1.16)$$

де $\eta'_n = \eta_n \cdot \eta_\delta$ – ККД при передачі потужності від двигуна до вантажу;

η_δ – ККД барабану;

η_n – ККД передавального пристрою при передачі руху від валу двигуна до барабану.

1.4.3 Приведення до валу двигуна моментів інерції мас, що обертово та поступово рухаються

Приведення до валу двигуна моментів інерції мас, що обертово та поступово рухаються, розглянемо на прикладі кінематичної схеми механізму підйому крана, яка наведена на рис.1.8,а.

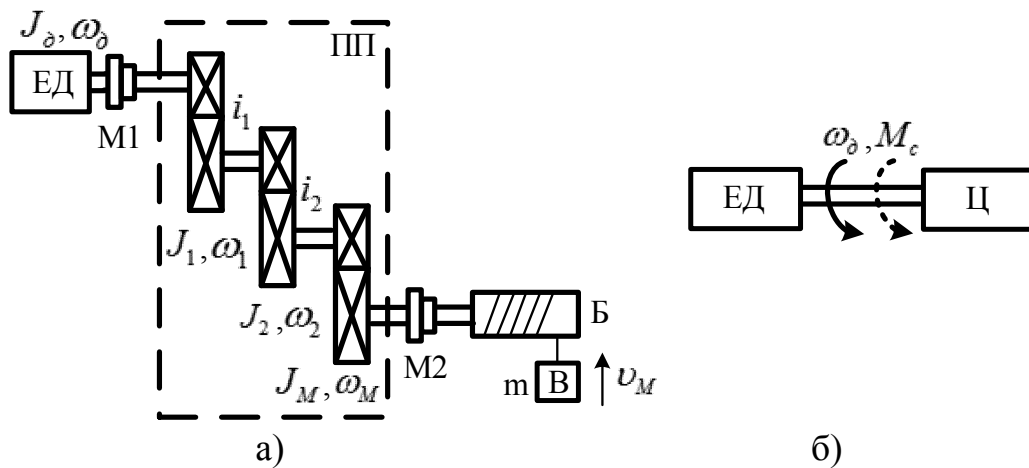


Рис.1.8. Кінематична схема ЕП підйому крана: а – вихідна; б – спрощена еквівалентна після приведення (де М1, М2 – муфти; Ц – циліндр, з'єднаний з валом двигуна).

Як відомо з теоретичної механіки, кінетична енергія W тіл, що рухаються, розраховується із залежностей:

$$W = m \frac{v^2}{2} - \quad (1.17)$$

для поступового руху,

$$W = J \frac{\omega^2}{2} - \quad (1.18)$$

для обертального руху.

В формулах (1.17) і (1.18) використовуються наступні позначення: v і ω – лінійна та кутова швидкість руху відповідно; m і J – маса та момент інерції тіл, що рухаються.

З використанням залежностей (1.17) і (1.18) розрахуємо загальну кінетичну енергію всіх ланок (складових частин) кінематичної схеми електропривода на рис.1.8,а:

$$W = J_{\partial} \frac{\omega_{\partial}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + J_M \frac{\omega_M^2}{2} + m \frac{v_M^2}{2}, \quad (1.19)$$

де J_{∂} – сумарний момент інерції двигуна, муфти М1 та першої шестерні, які обертаються з однаковою частотою ω_{∂} ;

J_1 – сумарний момент інерції другої та третьої шестерні, які обертаються з кутовою частотою ω_1 ;

J_2 – сумарний момент інерції четвертої та п'ятої шестерні, які обертаються з однаковою частотою ω_2 ;

J_M – сумарний момент інерції останньої шестерні редуктора, муфти М2 та барабана Б, які обертаються з однаковою частотою ω_M ;

m – маса вантажу, що рухається поступово з лінійною швидкістю v_M .

Для еквівалентної (приведеної до валу двигуна) спрощеної кінематичної схеми (наведеної на рис.1.8,б у вигляді циліндра Ц, з'єданого безпосередньо з валом двигуна) сумарна кінетична енергія всіх ланок вихідної кінематичної схеми на рис.1.8,а визначається згідно формули (1.18) у вигляді:

$$W = J \frac{\omega_{\partial}^2}{2}, \quad (1.20)$$

де J – еквівалентний (приведений до валу двигуна) момент інерції привода;

ω_{∂} – частота обертання валу двигуна.

Прирівняв між собою (1.19) та (1.20), знайдемо еквівалентний (приведений) момент інерції приводу:

$$J = J_{\partial} + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_{\partial}^2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega_{\partial}^2} + J_M \frac{\omega_M^2}{\omega_{\partial}^2} + m \frac{v_M^2}{\omega_{\partial}^2}. \quad (1.21)$$

Замінивши в (1.21) відношення кутових частот передавальними співвідношеннями:

$$\frac{\omega_1}{\omega_{\partial}} = \frac{1}{i_1}; \quad \frac{\omega_2}{\omega_{\partial}} = \frac{1}{i_2}; \quad \frac{\omega_M}{\omega_{\partial}} = \frac{1}{i_M}, \quad (1.22)$$

отримаємо остаточну залежність для розрахунку приведенного (до валу двигуна) моменту інерції приводу:

$$J = J_{\partial} + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_2^2} + J_M \frac{1}{i_M^2} + m \frac{v_M^2}{\omega_{\partial}^2}, \quad (1.23)$$

де i_1, i_2, i_M – передаточні коефіцієнти відповідно: між першою та другою шестернею, першою і третьою, першою і четвертою шестернею, першою і п'ятою (барабаном).

Контрольні питання

1. Рівняння руху електропривода, назва величин, які до нього входять, та їх розмірність.
2. Динамічний момент електропривода, його значення, що відповідає режимам розгону, гальмування та усталеної роботи.
3. Аналітичні залежності для перерахунку частоти обертання n (об/хв.) та махового моменту GD^2 двигуна відповідно в ω (рад/с) та момент інерції J (кг·м²).
4. Приведення статичного моменту опору робочої машини до валу двигуна (за обертальним та поступальним рухом робочої машини).
5. Приведення до валу двигуна моментів інерції мас, що обертово та поступово рухаються.

1.5 Види статичних моментів

Статичні моменти поділяються на дві групи:

- реактивні;
- активні.

До *реактивних моментів опору* належать такі, які завжди перешкоджають руху (тобто направлені в протилежному напрямку обертання валу ЕМ). До зазначених моментів відносяться: моменти тертя, різання металу й гірських порід та інші.

Для *активних статичних моментів* їх напрямок не залежить від напрямку обертання валу ЕМ. Зазначені моменти виникають від впливу ваги вантажу, стиснення, розтягнення або кручення пружних тіл. Прикладом активного моменту опору – є його виникнення на барабані крана при підйомі або спуску вантажу (незалежно від режиму підйому або спуску, тобто напрямку обертання валу двигуна й барабану, на який намотується трос, напрямок моменту опору залишається незмінним та визначається напрямком дії сили тяжіння вантажу).

Статичні моменти M_c можуть не залишатися незмінними, а варіюватися в залежності від різноманітних факторів:

- швидкості;
- шляху;
- часу та інше.

1.5.1 Статичні моменти, які залежать від швидкості

Статичні моменти, які залежать від швидкості, поділяються на наступні основні види:

- 1 – постійний активний момент;
 - 2 – постійний реактивний момент;
 - 3 – вентиляторний момент;
 - 4 – момент з гіперболічною залежністю.
- Дані види моментів показані на рис.1.9.

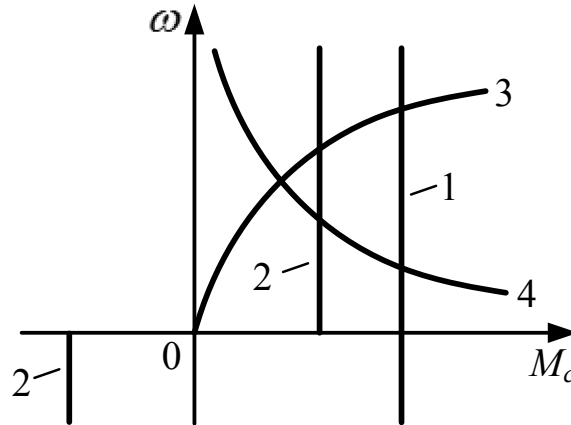


Рис.1.9 Статичні моменти, які залежать від швидкості

Постійний активний момент залишається незмінним при зміні швидкості ω та її напрямку (знаку). Такий момент створюється за рахунок дії різноманітних потенціальних сил – сили тяжіння, пружної деформації тіл та інше. При одному напрямку швидкості ω активний момент чинить опір руху (наприклад, підйом вантажу та $\omega > 0$), а при іншому (спуск вантажу та $\omega < 0$) – сприяє руху. Даний момент опору властивий підйомним механізмам.

Постійний реактивний момент (який ще часто називають моментом сухого тертя) змінює свій знак при зміні знаку полярності швидкості ω двигуна і завжди спрямований назустріч руху валу (тобто завжди чинить опір руху). Реактивний момент опору створюється головним чином силами тертя. Таку характеристику (або близьку до неї) мають механізми подавання станків, горизонтальні конвеєри та транспортери, механізми переміщення підйомних кранів.

Вентиляторний статичний момент характеризується тим, що зі зростанням швидкості відбувається його збільшення, наприклад, за наступними законами:

$$\left. \begin{aligned} M_c &= K\omega, \\ M_c &= K\omega^2, \\ M_c &= K\omega^3, \\ M_c &= K\omega^n \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

де $n \geq 1$, а K коефіцієнт пропорційності.

Даний момент навантаження властивий для вентиляторів, відцентрових компресорів, димососів (для цих механізмів момент M_c приблизно пропорційний квадрату швидкості ω^2).

Гіперболічний статичний момент характеризується тим, що зі збільшенням швидкості відбувається зменшення статичного моменту. Такий статичний момент властивий: намотувальним пристроям, механізмам головного руху токарних та фрезерувальних станків, тяговим електроприводам (в електро- та автомобільному транспорті). В автомобілі за допомогою коробки передач збільшують швидкість при зменшенні M_c , залишаючи незмінною потужність встановленого двигуна.

При цьому гіперболічна характеристика статичного моменту виду $M_o \sim 1/\omega$ забезпечує раціональне використання двигуна за потужністю: $P \sim \omega \uparrow M_o \downarrow \approx \text{const}$ та називається характеристикою *сталості потужності* (оскільки при збільшенні швидкості не потребує збільшення встановленої потужності двигуна).

Відмітимо, що наведена класифікація видів статичних моментів в деякій мірі ідеальна, характеризуючи загальну тенденцію змінення моменту навантаження від частоти ω обертання двигуна. Насправді в реальних механізмах характеристики на деяких ділянках відрізняються від згаданих ідеалізованих кривих. Наприклад, реальна характеристика статичного моменту вентилятора (насоса) показана на рис.1.10 і вона описується більш складною залежністю (ніж розглянута), тому на практиці слід користуватися при розрахунку привода реальною залежністю $M_c(\omega)$ конкретного робочого механізму.

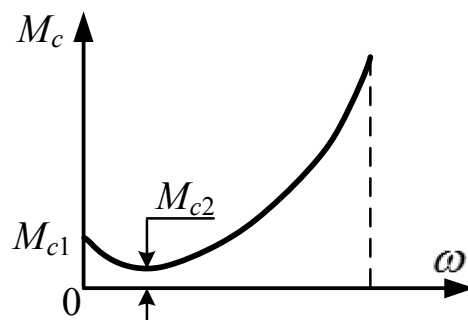


Рис.1.10 Реальна характеристика статичного моменту вентилятора (насоса).

На рис.1.10 позначення M_{c1} відповідає сухому тертю. З початком обертання збільшується подача масла до підшипника, що призводить до зменшення тертя.

1.5.2 Моменти опору, які залежать від кута повороту валу й шляху

Механічну характеристику *поршневого компресора* ілюструє залежність $M_c(\alpha)$, яка показана на рис.1.11, де M_{cp} – середнє значення статичного моменту.

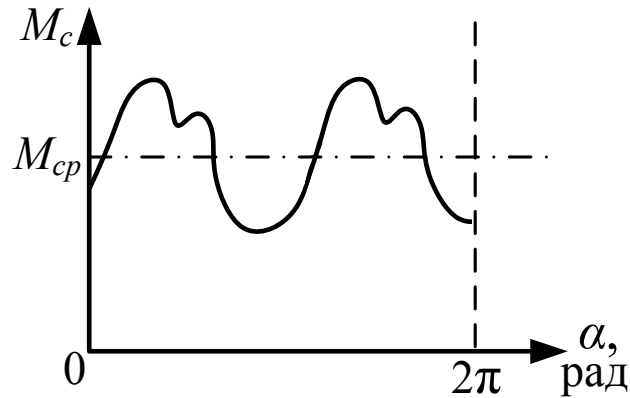


Рис.1.11 Характеристика статичного моменту поршневого компресора

Такого виду характеристики властиві робочим машинам, які мають кривошипно-шатунний механізм (поршневі насоси й компресори, лісопильні рами, станки-качалки для нафти та інше).

В транспортних й підйомних механізмах момент опору залежить не тільки від швидкості, але й – від шляху. Ілюстрація такої залежності на прикладі руху вагону вгору представлена на рис.1.12. Сила опору F при русі вагону розраховується у вигляді:

$$F = G \sin \alpha \quad (1.25)$$

та залежить від кута нахилу α шляху (де G – вага вагону з вантажем).

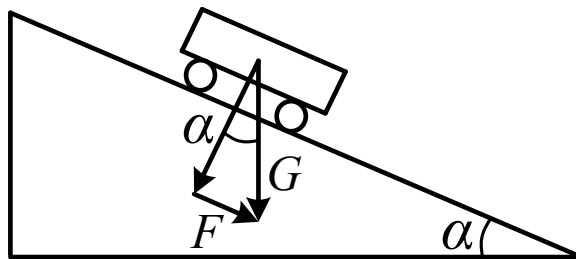


Рис. 1.12 Ілюстрація до залежності моменту опору від шляху (на прикладі руху вагону вгору)

Також в підйомних механізмах приходиться спочатку підіймати тільки вагу каната (троса), а потім сумарну вагу каната (троса) та вантажу. Причому, при великій висоті підйому вага каната (троса) може складати великі значення і бути сумірною з вагою вантажу.

Слід зазначити, що застосовуючи зрівноважуваний канат (трос) можна виключити вплив ваги каната й полегшити роботу підйомної установки.

1.5.3 Статичні моменти опору, які залежать від часу

Статичні моменти в залежності від змінення у часі навантаження поділяються на групи:

1) *постійне тривале навантаження* (відцентрові насоси й вентилятори, довгочасно увімкненні при незмінних умовах роботи, папіроробні машини та інше);

2) *змінне тривале навантаження* (металорізальні станки, підйомні лебідки, транспортери, конвеєри та інше);

3) *пульсуюче навантаження* (поршневі насоси і компресори, лісопильні рами, ткацькі станки і взагалі всі види машин з кривошипним механізмом);

4) *ударне навантаження* (з явно вираженими регулярно повторюваними поштовхами або піками навантаження – наприклад, прокатні стани, ножичні станки, преси, кувальні молоти та інше); для даних механізмів характерна наявність значних махових мас (звичайно у вигляді спеціального маховика);

5) *повторно-короткочасне навантаження* (всі види підйомно-транспортних механізмів, рольганги, залізничні поворотні круги, землечерпалки та інше);

6) *короткочасне навантаження* (розгонні двигуни, двигуни генераторів для періодичного заряджання акумуляторних батарей та інше).

Контрольні питання

1. Реактивні та активні статичні моменти (їх залежність від швидкості; приклади видів навантаження робочих машин, що їх визивають).

2. Класифікація статичних моментів, які залежать від швидкості. Аналітичні та графічні залежності для цих статичних моментів. Приклади робочих машин, які визивають відповідні статичні моменти.

3. Статичні моменти, які залежать від кута повороту валу двигуна (приклади графічних залежностей для таких моментів та відповідних їм робочих машин та механізмів).

4. Статичні моменти, які залежать від шляху руху робочої машини (ілюстрація даної залежності та приклади відповідних робочих машин).

5. Класифікація статичних моментів, які залежать від часу, і приклади відповідних до них робочих машин.

1.6 Обмеження робочих координат електропривода та визначення сталих координат його роботи

1.6.1 Обмеження робочих координат електропривода

Робочими координатами в електроприводі називаються параметри режиму (струм, обертовий момент, швидкість, положення, прискорення, уповільнення) електропривода.

В реальному електроприводі завжди існує необхідність обмеження робочих координат електропривода, основними з яких є: струм, швидкість, прискорення та уповільнення. Розглянемо необхідність виконання зазначених обмежень.

Наприклад, для ЕМ постійного струму слід обмежувати якірний струм $I_{я}$ на рівні $I_{я\max}$:

$$I_{я} < I_{я\max} = (2,5 - 3)I_{яH} \quad (1.26)$$

за умов нормальної комутації цього струму в колекторі машини (при більших якірних струмах починає відбуватися іскріння на колекторі, яке може перейти в круговий вогонь на колекторі і виходу із ладу машини). В формулі (1.26) параметр $I_{яH}$ позначає номінальне значення якірного струму ЕМ цієї машини.

Частота обертання (швидкість) ротора n для ЕМ всіх типів не повинна перевищувати її максимальне припустиме значення n_{\max} :

$$|n| \leq n_{\max} . \quad (1.27)$$

При цьому значення n_{\max} зазначається в паспортних даних для кожного конкретного типу ЕМ. При швидкості вище максимально припустимої n_{\max} відбувається підвищене зношення або поломка підшипників, а також може статися механічне пошкодження обмоток якоря машини.

В ряді механізмів (особливо великої потужності, де мінімальні запаси за механічною міцністю) необхідно обмежувати максимальні значення прискорення та уповільнення швидкості валу ЕМ:

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\max} . \quad (1.28)$$

Невиконання даної умови приводить до поломки редуктора й механічної частини робочої машини, а в насосах – до гідроударів при їх пуску й пориву трубопроводів.

Тому на практиці необхідно (і це дуже важливо) підтримувати обмеження робочих координат: якірного струму, швидкості, прискорення й уповільнення (останнє здійснюється встановленням в систему регулювання задавача інтенсивності).

1.6.2 Визначення сталих значень робочих координат електропривода

Статичною механічною характеристикою (СМХ) електропривода називається залежність швидкості ω електродвигуна від його обертового моменту M :

$$\omega_{cm} = f(M_{cm}) . \quad (1.29)$$

у сталих режимах роботи електропривода.

Для знаходження основних робочих координат (зокрема, обертового моменту M_{cm} і швидкості ω_{cm}) електродвигуна у сталих режимах роботи ЕП потрібно:

1) на механічній діаграмі ЕП побудувати статичну механічну характеристику електропривода: $\omega(M)$;

2) на цій механічній діаграмі ЕП побудувати навантажувальну характеристику $M_c(\omega)$ робочої машини (механізму), яка представляє собою залежність статичного моменту M_c від швидкості ω двигуна;

3) визначити шукані значення швидкості ω_{cm} та обертового моменту M_{cm} електродвигуна (у вигляді проекцій на осі ω й M механічної діаграми) в точці перетину зазначених статичної механічної і навантажувальної характеристик.

Останнє випливає з залежності (1.11) із врахування рівності:

$$M_{дин} = M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} = 0, \quad (1.30)$$

оскільки саме точка перетину згаданих характеристик, очевидно, відповідає сталому режиму роботи ($\omega = \text{const}$, $M_{cm} = M_c$).

Наведена на рис.1.13 механічна діаграма ЕП ілюструє приклад визначення сталих значень швидкості ω_{cm} та обертового моменту M_{cm} двигуна, які представляють собою проекції відповідно на осі ω й M механічної діаграми з точки N перетину статичної механічної характеристики $M(\omega)$ двигуна (крива 1) і навантажувальної характеристики $\omega(M_c)$ робочої машини (крива 2).

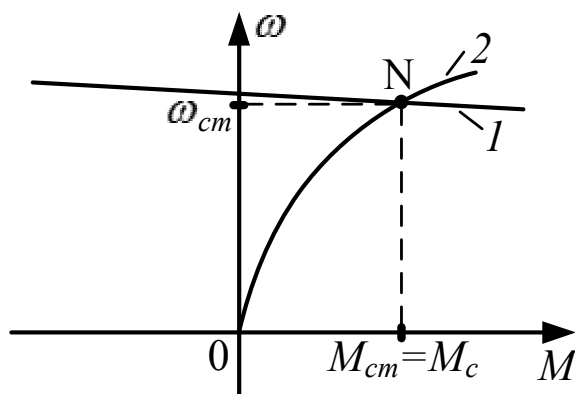


Рис.1.13 Ілюстрація визначення сталих координат M_{cm} , ω_{cm} на механічній діаграмі ЕП

Контрольні питання

1. Основні робочі координати електропривода.
2. Основні робочі координати, які необхідно обмежувати (та на якому рівні) при функціонуванні електропривода.
3. Визначення сталих значень швидкості та електромагнітного моменту двигуна за допомогою статичних механічних характеристик електропривода (обґрунтування та ілюстрація прикладом).

1.7 Жорсткість статичних механічних характеристик двигуна й визначення стійкості роботи електропривода

1.7.1 Жорсткість статичних механічних характеристик електродвигуна

Нагадаємо, що під статичними механічними характеристиками розуміються залежності швидкості ω двигуна від електромагнітного моменту M , що він розвиває: $\omega = f(M)$.

Жорсткістю СМХ в електроприводі називають значення похідної від електромагнітного моменту M за швидкістю ω :

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (1.31)$$

Проілюструємо визначення жорсткості СМХ на прикладі двох видів статичних механічних характеристик, що показані на рис.1.14 кривими 1 і 2 (перша з них відповідає електродвигуну постійного струму, а друга асинхронному електродвигуну). Нехай обидва двигуна працюють при однаковому статичному моменті M_c : в точках N_1 та N_2 їх СМХ відповідно.

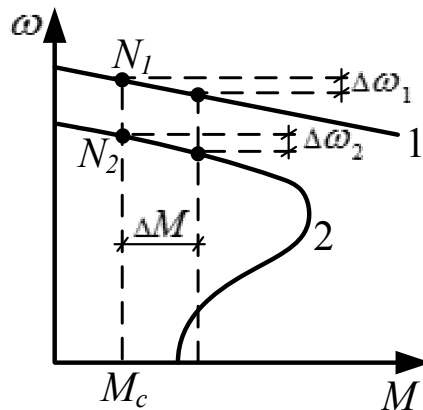


Рис.1.14 Визначення жорсткості статичних механічних характеристик.

Для визначення в зазначених точках (N_1 і N_2) значень жорсткості СМХ для цих двигунів здійснено змінення на величину ΔM значення їх статичного моменту. Цій зміні статичного моменту будуть відповідати на рис.1.14 зміни швидкості на значення $\Delta \omega_1$ та $\Delta \omega_2$ відповідно. Обчисливши згідно останнього виразу в формулі (1.31) значення жорсткості: $\beta_1 = \Delta M / \Delta \omega_1$ і $\beta_2 = \Delta M / \Delta \omega_2$ для кривих 1 та 2, встановимо, що $\beta_1 > \beta_2$ (тобто характеристика 1 “жорсткіша” ніж характеристика 2 при значенні розглядуваного статичного моменту M_c).

При цьому, чим ближче СМХ двигуна до горизонтальної прямої ($\Delta \omega = 0$), тим вона – жорсткіша (похідна β наближається до нескінченності: $\beta = \infty$). І, навпаки, при наближенні СМХ двигуна до вертикальної прямої ($\Delta M = 0$) – вона м’якша (похідна β наближається до нуля: $\beta = 0$).

1.7.2 Визначення стійкості сталого режиму електропривода

Існують наступні основні види систем керування електроприводами:

1) розімкнені (тобто без автоматичних регуляторів і зворотних зв'язків за координатами привода) – найпростіші системи привода, наприклад, з релейно-контакторним керуванням;

2) замкнуті (з автоматичними регуляторами і зворотними зв'язками за регульованими координатами привода: швидкістю або ЕРС, струму, положення). Електроприводи з такою системою керування є більш довершеними, вони мають високу якість регулювання й досягають стійкої роботи в будь-якому режимі.

Оскільки питання оцінювання стійкості для замкнених систем регулювання (з автоматичними регуляторами і зворотними зв'язками) електроприводів розглядаються з використанням теорії автоматичного регулювання, то далі детальніше зупинимося тільки на оцінюванні стійкості електроприводів з розімкненими системами регулювання (без зворотних зв'язків та автоматичних регуляторів).

При цьому будемо вважати, що *стійкий рух* – це такий сталий рух, який, якщо буде виведений з сталого режиму будь-яким зовнішнім збуренням, повертається в цей режим після зникнення зазначеного впливу.

В електроприводах з розімкненими системами керування слід обов'язково проводити оцінку стійкості. При здійсненні зазначеного оцінювання будемо вважати, що прикладається невеликий додатковий (по відношенню до статичного моменту M_c) короткочасного впливу момент навантаження ΔM_c (згідно показаного його значення на рис.1.15).

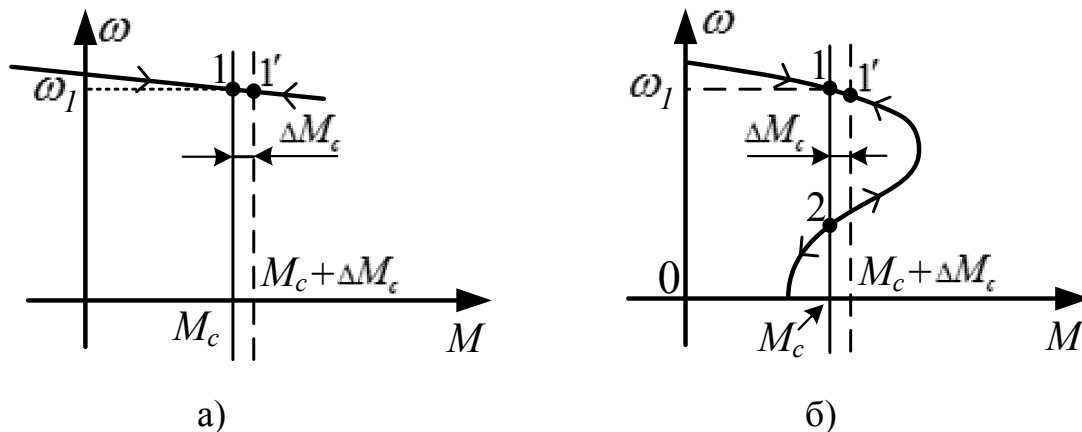


Рис.1.15 Ілюстрація оцінювання стійкості електроприводів з розімкненими системами регулювання (а, б – різноманітні варіанти видів СМХ електродвигунів; 1 та 2 – відповідно стійкі та нестійкі точки роботи двигунів в сталих режимах)

Спочатку виконаємо оцінювання стійкості роботи двигуна зі статичною механічною характеристикою, показаною на рис.1.15,а. Нехай у вихідному стані робота двигуна характеризувалася робочою точкою 1 на рис.1.15,а (тобто точкою перетину СМХ двигуна з початковим значенням статичного моменту

M_c). Перевірку стійкості роботи двигуна виконаємо шляхом аналізу прикладення додаткового зовнішнього збурення $\Delta M_c > 0$ до раніше діючого статичного моменту M_c (в результаті чого сумарний статичний момент короткочасно збільшується до значення $M_c + \Delta M_c$).

З врахуванням зазначеного прикладення додаткового збурення ΔM_c рівняння руху електропривода (виходячи з того, що у вихідному стані момент M двигуна дорівнював статичному моменту: $M = M_c$) приймає вигляд:

$$M_{дин} = M - (M_c + \Delta M_c) = -\Delta M_c = J \frac{d\omega}{dt} < 0. \quad (1.32)$$

З останнього виразу випливає, що після прикладення збурення $\Delta M_c > 0$ швидкість двигуна зменшується і при цьому робоча точка на рис.1.15,а рухається по СМХ двигуна від точки 1 до точки 1', а електромагнітний момент M двигуна збільшується до значення $M_c + \Delta M_c$. В точці 1' настає сталий режим роботи електропривода, якому відповідає рівняння руху електропривода:

$$M_{дин} = (M_c + \Delta M_c) - (M_c + \Delta M_c) = J \frac{d\omega}{dt} = 0. \quad (1.33)$$

В той момент часу, коли відбувається припинення дії збурення ΔM_c (наприклад, в точці 1') рівняння руху електропривода з врахуванням аналогічних міркувань приймає інший вигляд:

$$M_{дин} = (M_c + \Delta M_c) - M_c = \Delta M_c = J \frac{d\omega}{dt} > 0.. \quad (1.34)$$

Згідно цього виразу при зникненні збурення ($\Delta M_c = 0$) динамічний момент $M_{дин} > 0$, швидкість двигуна збільшується (робоча точка рухається на рис.1.15,а по СМХ двигуна від точки 1' до точки 1). Таким чином після припинення дії короткочасного впливу ΔM_c швидкість і електромагнітний момент відновлюються (а саме – в точці 1 динамічний момент електропривода дорівнює нулю і продовжується стійкий сталий режим роботи двигуна). Це означає, що робоча точка 1 на рис.1.15,а відповідає стійкому режиму функціонування електропривода з розімкненою системою регулювання. Відмітимо, що аналогічним аналізом підтверджується стійка робота в тій самій точці 1 при прикладенні короткочасного збурення від'ємної полярності ($\Delta M_c < 0$).

Розглянемо оцінювання стійкості сталого режиму роботи на СМХ двигуна, що показано на рис. 1.15,б. Звернемо увагу на те, що для цієї СМХ існує дві точки перетину (1 і 2) з характеристикою статичного моменту M_c . При чому робота в точці 1 на СМХ є стійкою і доводиться аналогічно раніше проведеному аналізу для СМХ на рис.1.15,а.

Тому далі детальніше зупинимося тільки на оцінюванні стійкості роботи електропривода в точці 2 на СМХ двигуна, що наведено на рис.1.15,б. При прикладенні зовнішнього додаткового збурення ΔM_c за моментом опору M_c

швидкість ω двигуна зменшується згідно його СМХ. Після того, як зникає вплив ΔM_c , згідно з основним рівнянням руху аналогічно виразу (1.32)

$$M_{дин} = M - (M_c + \Delta M_c) = -\Delta M_c = J \frac{d\omega}{dt} < 0$$

виникає динамічний момент $\Delta M_c < 0$, який приводить до зменшення швидкості ω за кривою СМХ вліво від точки 2. Якщо після зазначеного зменшення швидкості ω двигуна припинити дію збурення ($\Delta M_c = 0$), електромагнітний момент двигуна залишається менше статичного моменту $M < M_c$ та швидкість двигуна продовжує зменшуватись до нульового значення ($\omega = 0$).

У випадку прикладення від'ємного значення збурення $\Delta M_c < 0$ аналогічними розмірковуваннями доводиться, що динамічний момент електропривода стає додатнім ($M_{дин} > 0$), швидкість ω двигуна збільшується за кривою СМХ вправо. Якщо ж припинити дію збурення ($\Delta M_c = 0$), то із-за збільшення електромагнітного моменту двигуна динамічний момент залишається додатнім, швидкість продовжує збільшуватись (внаслідок розгону двигуна) за кривою СМХ на рис.1.15,б до значення швидкості в точці 1 (у якій настає сталий режим роботи електропривода). Таким чином, точка 2 на рис.1.15,б (як і всі точки на ділянці СМХ двигуна, що розташовані нижче швидкості, яка відповідає максимальному значенню електромагнітного моменту двигуна) характеризуються нестійким режимом роботи електропривода з розімкненою системою регулювання. А саме, при роботі на зазначеній частині СМХ двигуна він із свого нестійкого стану обов'язково переходить в один із згаданих двох стійких станів: гальмується до зупиненого стану або розганяється до стійкої точки 1 роботи на СМХ згідно рис. 1.15,б.

Наприкінці відмітимо, що при використанні замкненої системи регулювання (яка містить автоматичні регулятори та зворотні зв'язки) можливо здійснити стійку роботу двигуна на розглянутій ділянці СМХ на рис.1.15,б на якому відбувається нестійкий режим роботи з розімкненою системою регулювання електропривода.

Контрольні питання

1. Жорсткість статичної механічної характеристики електропривода. Аналітична та графічна залежності, що ілюструють визначення жорсткості статичної механічної характеристики.
2. Відмінні особливості розімкнутих та замкнутих систем автоматичного керування електроприводом.
3. Що розуміється під сталим режимом роботи електропривода?
4. Спосіб оцінки стійкості сталої роботи електропривода з розімкненою автоматичною системою керування (приклади стійкого та нестійкого режимів роботи такого електропривода).

1.8 Оптимізація передавального числа редуктора

На практиці представляє інтерес знаходження оптимального значення передавального числа редуктора $i_{p.opt}$, при якому забезпечується максимальне прискорення (або гальмування) привода. Це особливо важливо для робочих механізмів, які працюють в частих (інтенсивних) пуско-гальмівних режимах, де забезпечення максимального прискорення (гальмування) привода дозволяє підвищити продуктивність робочих механізмів.

Для виконуючого органу (ВО) робочої машини з обертальним рухом запишемо рівняння руху:

$$M \cdot \eta_p \cdot i_p - M_{B.O.} = (J_\delta i_p^2 + J_{B.O.}) \frac{d\omega_{B.O.}}{dt}, \quad (1.35)$$

де M – момент двигуна;

$M_{B.O.}$ – момент опору виконуючого органу;

J_δ – момент інерції двигуна;

$J_{B.O.}$ – момент інерції виконуючого органу;

i_p – передавальне число редуктора;

η_p – ККД редуктора;

$\omega_{B.O.}$ – кутова частота обертання виконуючого органу.

З виразу (1.35) знайдемо величину прискорення (гальмування) виконуючого органу:

$$\xi_{B.O.} = \frac{d\omega_{B.O.}}{dt} = \frac{M \cdot \eta_p \cdot i_p - M_{B.O.}}{J_\delta i_p^2 + J_{B.O.}}. \quad (1.36)$$

Для знаходження оптимального передавального числа редуктора візьмемо похідну $\frac{d\xi_{B.O.}}{di_p}$ від прискорення $\xi_{B.O.}$ виконуючого органу та прирівняємо її до нуля:

$$\frac{d\xi_{B.O.}}{di_p} = \frac{M\eta_p(J_\delta i_p^2 + J_{B.O.}) - (M\eta_p i_p - M_{B.O.})2J_\delta i_p}{(J_\delta i_p^2 + J_{B.O.})^2} = 0. \quad (1.37)$$

Після перетворення отримаємо:

$$\frac{M\eta_p J_\delta \left(i_p^2 + \frac{J_{B.O.}}{J_\delta} - 2i_p^2 + \frac{2M_{B.O.}}{M\eta_p} i_p \right)}{(J_\delta i_p^2 + J_{B.O.})^2} = 0. \quad (1.38)$$

Перетворимо (1.38) до наступного рівняння відносно змінної i_p :

$$i_p^2 - \frac{2M_{B.O.}}{M\eta_p} i_p - \frac{J_{B.O.}}{J_\delta} = 0. \quad (1.39)$$

З розв'язку останнього рівняння знайдемо оптимальне значення $i_{p.opt}$ для передавального числа редуктора:

$$i_{p.onm.}^2 = \frac{2M_{B.O.}}{M\eta_p} + \sqrt{\left(\frac{M_{B.O.}}{M\eta_p}\right)^2 + \frac{J_{B.O.}}{J_\delta}}. \quad (1.40)$$

Для роботи виконуючого органу на холостому ході (коли $M_{B.O.} = 0$) отримаємо:

$$i_{p.onm.}^2 = \sqrt{\frac{J_{B.O.}}{J_\delta}}. \quad (1.41)$$

Вибір передавального числа редуктора для режиму холостого ходу доцільно здійснювати, наприклад, для електропривода столу поздовжньо-стругального станка, в якому різання металу відбувається при стійкій швидкості для руху “Вперед”, а режими розгону, гальмування та сталого руху столу у напрямку “Назад” відбуваються практично на холостому ході (практично без навантаження).

Слід зазначити, що оптимізація передавального числа $i_{p.onm.}$ редуктора може виконуватись не тільки за максимальним прискоренням (гальмуванням), але і за іншими параметрами (наприклад, за мінімізацією часу відпрацювання заданого шляху та інше).

Контрольні питання

1. Загальна постановка задачі та основні критерії оптимізації передатного числа редуктора.
2. Оптимізація передатного числа редуктора за швидкодією в режимах розгону та гальмування електропривода. Області застосування даних оптимальних режимів.

1.9 Розрахунок перехідних механічних процесів електропривода

Розрахунок перехідних механічних процесів електропривода може здійснюватися:

- аналітичним методом;
- графо-аналітичним методом;
- імітаційним моделюванням (за допомогою комп’ютерних програм, наприклад, MatLab).

1.9.1 Ілюстрація аналітичного методу

Ілюстрацію аналітичного методу проведемо на прикладі розрахунку перехідного механічного процесу швидкості $\omega(t)$ для режиму розгону тиристорного електроприводу постійного струму з незмінним значенням динамічного моменту: $M_{дин} = M - M_c = \text{const}$.

Вихідні умови для розрахунку зазначеного режиму розгону наступні:

$$M = M_{\max} = c\Phi_H I_{Я\max} \text{ при } I_{Я\max} = 2I_{ЯН}; M_c = \text{const},$$

де $I_{ЯН}$ – номінальне значення якірного струму двигуна;

Φ_H – номінальне значення магнітного потоку двигуна;

M_c – статичний момент приводу;

c – конструктивна постійна двигуна постійного струму.

Даному електроприводу відповідають статичні механічні характеристики (показані у вигляді сімейства паралельних горизонтальних прямих) при незмінному значенні статичного моменту приводу, що показані на механічній діаграмі на рис.1.16. Режиму розгону двигуна з початкового нульового ($\omega_{\text{поч}} = 0$) до сталого значення ($\omega = \omega_{cm}$) швидкості відповідає годограф: 0-1-2-3 (де точка 0 – відповідає вихідному початковому стану двигуна, а точка 3 – сталому режиму роботи при заданій сталій швидкості ω_{cm}).

Режиму гальмування розглядуваного електропривода від сталого ($\omega = \omega_{cm}$) до нульового значення швидкості відповідає годограф: 3-4-5-0, де точка 3 (зі значенням швидкості $\omega = \omega_{cm}$) відноситься до початку режиму гальмування, а точка 0 (з нульовим значенням швидкості) – до закінчення режиму гальмування.

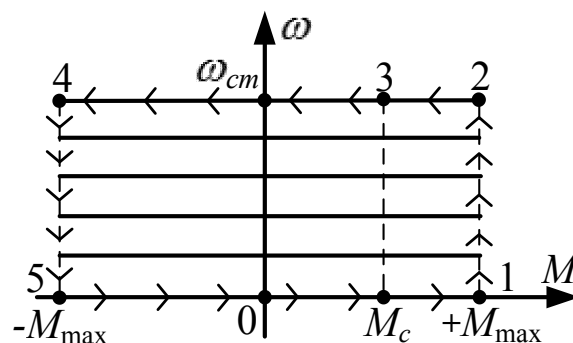


Рис.1.16 CMX тиристорного електропривода постійного струму

Розрахунок механічного перехідного процесу швидкості ω для режиму розгону розглядуваного електропривода виконаємо з використанням основного рівняння руху (1.10) електропривода, з якого отримаємо диференціальне рівняння, що описує цей процес:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\max} - M_c}{J} = \frac{M_{\text{дин.р.}}}{J}, \quad (1.42)$$

де

$$M_{\text{дин.р.}} = M_{\max} - M_c \quad (1.43)$$

значення динамічного моменту при розгоні;

J – приведений до валу двигуна момент інерції приводу.

Перетворимо останнє рівняння до вигляду

$$d\omega = \frac{M_{\text{дин.р.}}}{J} dt. \quad (1.44)$$

Візьмемо від обох частин рівняння (1.44) визначенні інтеграли з врахуванням нульових початкових ($\omega = 0$ при часі $t = 0$) і довільних кінцевих умов (швидкості ω та часу t):

$$\int_0^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M_{\text{дин.п.}}}{J} dt = \frac{M_{\text{дин.п.}}}{J} \int_0^t dt. \quad (1.45)$$

При цьому останній вираз в (1.45) отримано, виходячи з незмінності раніше прийнятих значень: $M_{\text{дин.п.}} = \text{const}$ та $J = \text{const}$. Після інтегрування лівої та правої частин рівняння (1.45), отримаємо загальний вигляд аналітичної залежності для перехідного процесу зміни швидкості $\omega(t)$ при розгоні тиристорного електроприводу від нульової до довільної швидкості ω у вигляді:

$$\omega = \frac{M_{\text{дин.п.}}}{J} t = \frac{M_{\text{max}} - M_c}{J} t. \quad (1.46)$$

Окремим випадком зазначеного вище розв'язку буде аналітична залежність для розрахунку сталого значення швидкості ω_{cm} :

$$\omega_{\text{cm}} = \frac{M_{\text{дин.п.}}}{J} t_p = \frac{M_{\text{max}} - M_c}{J} t_p, \quad (1.47)$$

де t_p – час розгону електроприводу до сталої швидкості.

Зазначений час t_p згідно (1.47) розраховується у вигляді:

$$t_p = \frac{J \omega_{\text{cm}}}{M_{\text{дин.п.}}}. \quad (1.48)$$

Аналогічно (1.45) здійснюється розрахунок механічних процесів при гальмуванні тиристорного електроприводу від довільної ω_{cm} до нульової швидкості:

$$\int_{\omega_{\text{cm}}}^0 d\omega = \frac{M_{\text{дин.з.}}}{J} \int_0^t dt, \quad (1.49)$$

в результаті чого перехідний процес швидкості $\omega(t)$ при гальмуванні тиристорного електроприводу описується аналітичною залежністю:

$$\omega = \omega_{\text{cm}} + \frac{M_{\text{дин.з.}}}{J} t, \quad (1.50)$$

в якій

$$M_{\text{дин.з.}} = -M_{\text{max}} - M_c = -(M_{\text{max}} + M_c) - \quad (1.51)$$

динамічний момент тиристорного електропривода в режимі гальмування.

Вирішивши рівняння (1.50) відносно змінної t при рівності кінцевого значення швидкості нулю ($\omega = 0$), розрахуємо час гальмування t_{Γ} цього електропривода

$$t_{\Gamma} = -\frac{J \omega_{\text{cm}}}{M_{\text{дин.з.}}} = \frac{J \omega_{\text{cm}}}{M_{\text{max}} + M_c}. \quad (1.52)$$

На рис.1.17 наведено вигляд розрахованих із залежностей (1.46) та (1.50) перехідних механічних процесів швидкості $\omega(t)$ в режимах розгону та

гальмування тиристорного електропривода постійного струму, для якого статичні механічні характеристики $\omega(M)$ і статичний момент $M_c(\omega)$ були раніше представлені на рис. 1.16.

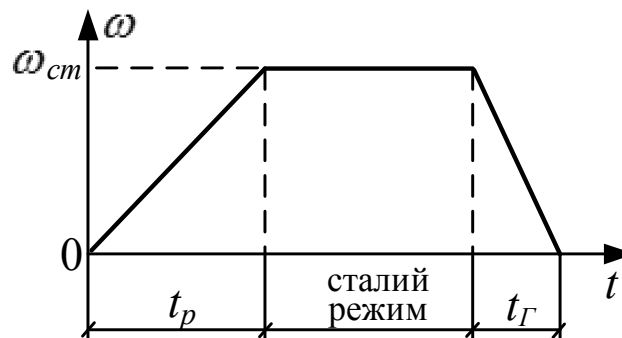


Рис.1.17 Часова діаграма зміни швидкості електропривода постійного струму в режимах розгону і гальмування

Приймаючи до уваги, що для розглядуваного електропривода значення динамічних моментів в режимах розгону і гальмування незмінні ($M_{дин.р.} = \text{const}$, $M_{дин.г.} = \text{const}$), то згідно отриманим залежностям (1.46) і (1.50) змінення швидкості в режимах розгону і гальмування будуть рівноприскореним та рівноуповільненим відповідно. З врахуванням того, що в даному електроприводі значення динамічного моменту $M_{дин.р.}$, що розраховується з (1.43) і створюється в двигуновому режимі за абсолютним значенням менше динамічного моменту $M_{дин.г.}$, що розраховується з (1.51) і створюється в гальмівному режимі, то на наведеній на рис.1.17 тахограмі $\omega(t)$ час розгону t_p перевищує час гальмування $t_Г$.

Наприкінці звернемо увагу на те, що розглянутий аналітичний метод розрахунку перехідних механічних процесів може бути використаний для електроприводів з системами автоматичного керування, які мають задавач інтенсивності (при наявності якого в динамічних режимах розгону і гальмування електропривода підтримуються незмінними значення динамічних моментів $M_{дин.р.}$ та $M_{дин.г.}$).

1.9.2 Ілюстрація графо-аналітичного методу

Даний метод застосовується для розрахунків механічних процесів для електроприводів, в яких значення динамічного моменту $M_{дин}$ в перехідних режимах змінюється ($M_{дин} \neq \text{const}$), коли застосування аналітичного методу стає неможливим.

Порядок розрахунку при графоаналітичному методі.

1) Розташовуються на одному рисунку поряд друг з другом (при чому на одному горизонтальному рівні) три діаграми з ортогональними системами координат (які позначені буквами а, б, в на рис.1.18).

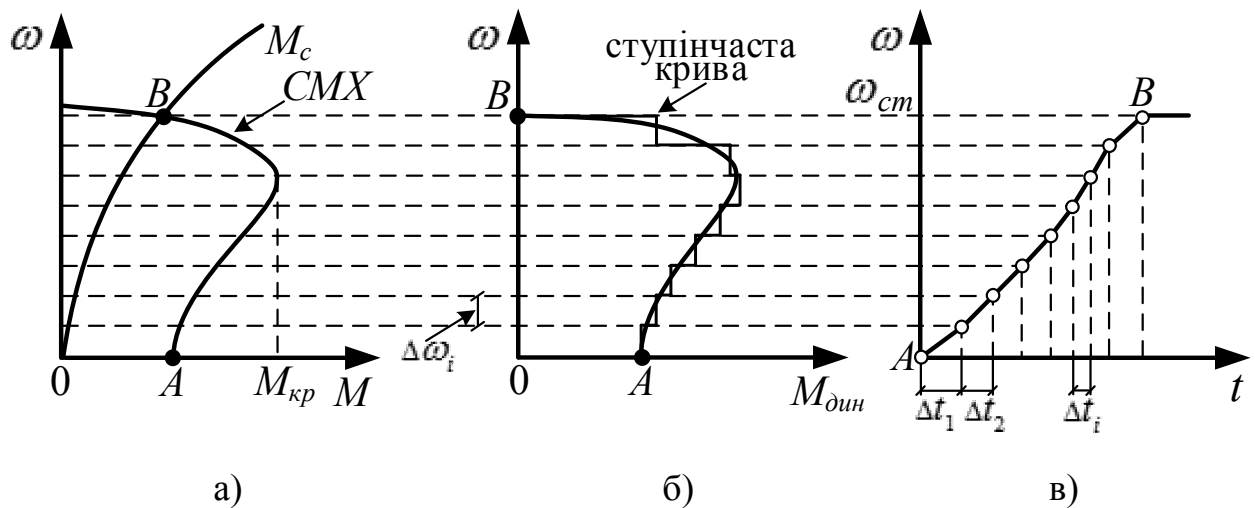


Рис.1.18 Ілюстрація графоаналітичного методу

2) На першій з цих діаграм (на рис.1.18,а) побудуємо статичні механічні характеристики $\omega(M)$ двигуна і статичну моментну характеристику $\omega(M_c)$ конкретного електропривода. У якості приклада розглянемо задачу визначення (розрахунку) перехідного процесу змінення швидкості $\omega(t)$ асинхронного короткозамкненого двигуна, що приводить до руху вентилятор. Для зазначених двигуна і вентилятора на діаграмі на рис.1.18,а приведені відповідні статична механічна характеристика (СМХ) двигуна і статична моментна характеристика вентилятора $\omega(M_c)$.

3) Загальний швидкісний робочий діапазон двигуна на всіх діаграмах на рис.1.18,а,б,в розбивається на ділянки з рівними інтервалами $\Delta\omega_i = \Delta\omega = \text{const}$ (чим більша кількість N інтервалів, тим точніший розрахунок), де i – номер інтервалу розбиття ($i=1,2,\dots,N$).

4) Виходячи з побудованих на рис.1.18,а графічних залежностей $\omega(M)$ і $\omega(M_c)$, розраховуємо на границях кожного i -го швидкісного інтервалу значення динамічного моменту $M_{\text{дин},i}$ з формули:

$$M_{\text{дин},i} = M_i - M_{ci}, \quad (1.53)$$

де M_i і M_{ci} – значення електромагнітного моменту і статичного моменту відповідно на i -му інтервалі швидкісного діапазону.

Згідно розрахункових даних будуємо на другій діаграмі (на рис.1.18,б) графічну залежність $\omega_i(M_{\text{дин},i})$ швидкості двигуна від динамічного моменту привода.

5) На кожному i -му інтервалі $\Delta\omega_i$ розраховується середнє значення динамічного моменту $M_{\text{дин.ср}(i)}$:

$$M_{\text{дин.ср}(i)} = \frac{0,5}{\Delta\omega} [M_{\text{дин},i} + M_{\text{дин},i+1}]. \quad (1.54)$$

6) Апроксимується крива $\omega(M_{\text{дин}})$ на другій діаграмі (рис. 1.18,б) на кожному i -му інтервалі швидкісного діапазону середніми значеннями

динамічного моменту $M_{\text{дин.ср}(i)}$ для відповідного i -го інтервалу (тобто – ступінчатою кривою з постійними значеннями моменту $M_{\text{дин.ср}(i)}$ на кожному i -му інтервалі).

7) Розраховуються (починаючи з першого) для кожного i -го інтервалу розбиття інтервали часу Δt_i , які відповідають збільшенню швидкості на значення $\Delta \omega_i$, із співвідношення:

$$\Delta t_i \approx \frac{J \Delta \omega_i}{M_{\text{дин.ср}(i)}}. \quad (1.55)$$

Останній вираз отримано з врахуванням апроксимації (1.11) значення диференціалів $d\omega$ та dt відповідними їх відхиленнями $\Delta \omega$ та Δt :

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} \approx J \frac{\Delta \omega}{\Delta t}. \quad (1.56)$$

8) Відкладемо на графіку на третій діаграмі (рис.1.18,в) розраховані інтервали часу Δt_i , які відповідають змінненню швидкості на значення $\Delta \omega_i$. З'єднавши точки (ω_i, t_i) між собою відрізками прямих, отримаємо криву швидкості $\omega(t)$ при розгоні електропривода.

Областю застосування розглянутого графоаналітичного методу розрахунку перехідних механічних процесів є електроприводи, в яких значення динамічного моменту не є незмінним в перехідних режимах привода, в тому числі – для здійснення приблизних спрощених розрахунків часів розгону, реверса і гальмування зазначених електроприводів.

Контрольні питання

1. Основні існуючі методи розрахунку перехідних механічних процесів електропривода.

2. Сутність аналітичного методу розрахунку перехідних механічних процесів електропривода та його ілюстрація на прикладі тиристорного електропривода постійного струму.

3. Сутність графоаналітичного методу розрахунку перехідних механічних процесів електропривода та його ілюстрація на прикладі режиму розгону вентилятора від асинхронного короткозамкненого двигуна.

4. Рациональні області застосування аналітичного та графоаналітичного методів розрахунку перехідних механічних процесів електропривода.

2 ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Основні математичні залежності для електричної машини постійного струму з незалежним збудженням

При отриманні математичних залежностей для електричних машин (ЕМ) постійного струму з незалежним збудженням (НЗ) та складанні схеми її заміщення використовуються наступні припущення:

- не враховуються внутрішні перехідні електромагнітні процеси в ЕМ (що на практиці припустимо для статичних (сталих), так і навіть для динамічних режимів, оскільки електромагнітні процеси протікають значно швидше, ніж механічні процеси в машині та приводі);
- при математичному описі машини застосовується система умовних одиниць вимірювання СІ (у зв'язку з переходом в усьому світі на дану систему, яка також спрощує зазначений опис).

Основні співвідношення для ЕМ постійного струму мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{я}} &= I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E, \\ E &= c \Phi \omega, \\ M &= c \Phi I_{\text{я}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де перше рівняння – це рівняння рівноваги напруг; друге – рівняння електрорушійної сили (ЕРС), а третє – рівняння електромагнітного моменту.

В рівняннях (2.1) прийняті наступні позначення:

$U_{\text{я}}$ [В] – напруга якоря;

E [В] – ЕРС якоря;

M [Нм] – електромагнітний момент;

ω [рад/с] – кутова частота обертання;

$I_{\text{я}}$ [А] – струм якоря;

$R_{\text{я}}$ [Ом] – опір якоря;

c – конструктивна стала машини;

Φ [Вб] – магнітний потік.

Згідно першого рівняння з системи (2.1) складемо схему заміщення ЕМ постійного струму для сталого режиму, яка наведена на рис.2.1. Показаний на цій схемі напрямок якірного струму $I_{\text{я}}$ (від якірної напруги $U_{\text{я}}$ до електрорушійної сили E) відповідає двигуневому режиму роботи ЕМ.

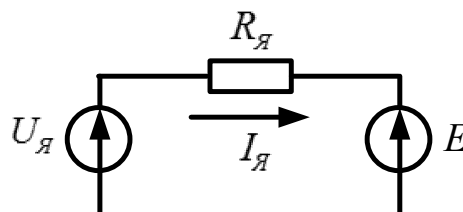


Рис.2.1 Схема заміщення ЕМ постійного струму.

Особливості співвідношень та наведеної схеми заміщення:

1) в залежності від режиму роботи ЕМ:

– в двигуновому режимі: $|U_{\text{я}}| > |E|$ й $I_{\text{я}} > 0$;

– в генераторному режимі: $|E| > |U_{\text{я}}|$ й $I_{\text{я}} < 0$;

– у режимі холостого ходу (коли електромагнітний момент M та струм якоря $I_{\text{я}}$ дорівнюють нулю: $M = 0$ і $I_{\text{я}} = 0$): $|U_{\text{я}}| = E$;

2) напрямки напруги якоря $U_{\text{я}}$ та ЕРС E завжди для сталих режимів зустрічні одне одному.

Звернемо увагу на те, що в іншій системі одиниць (де швидкість обертання n вимірюється в [об/хв], а електромагнітний момент M – в [кг·м]) змінюється в системі (2.1) вигляд другого та третього рівнянь на наступний:

$$\left. \begin{aligned} E &= c_e \Phi n, \\ M &= c_M \Phi I_{\text{я}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

де $c_M \neq c_e$ – конструктивні сталі ЕМ.

При цьому переведення швидкості (частоти обертання) з [об/хв] у [рад/с] виконується за допомогою залежностей:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9,55} \text{ [рад/с]}; \quad n = \frac{60\omega}{2\pi} = 9,55\omega \text{ [об/хв]}. \quad (2.3)$$

Контрольні питання

1. Основні математичні залежності для електричної машини постійного струму незалежного збудження (назва складових величин та їх розмірність).

2. Еквівалентна схема заміщення електричної машини постійного струму незалежного збудження, співвідношення в ній між собою для якірної напруги, електрорушійної сили та якірного струму (для двигунового та генераторного режимів, режиму холостого ходу).

2.2 Статичні характеристики електричної машини постійного струму незалежного збудження

Статичні характеристики ЕМ представляють собою аналітичні (або відповідні їм графічні) залежності одних значень робочих координат привода від інших робочих координат привода для сталого (статичного) режиму роботи машини.

До основних статичних характеристик ЕМ постійного струму відносяться:

– магнітна характеристика;

– зовнішня характеристика (що відповідає генераторному режиму роботи машини);

– механічна характеристика (що відповідає двигуневому режиму роботи машини).

2.2.1 Магнітна характеристика

Ця характеристика встановлює зв'язок магнітного потоку Φ електричної машини постійного струму (який створюється у повітряному зазорі машини її обмоткою збудження) від струму I_z в обмотці збудження:

$$\Phi = f(I_z). \quad (2.4)$$

Графічний вигляд магнітної характеристики для ЕМ незалежного збудження наведена на рис.2.2, де Φ_H і I_{zH} – номінальні значення відповідно магнітного потоку та струму збудження. Як випливає з даного рисунку, ця характеристика – нелінійна (через магнітне насичення осердя статора, ярма та головних полюсів).

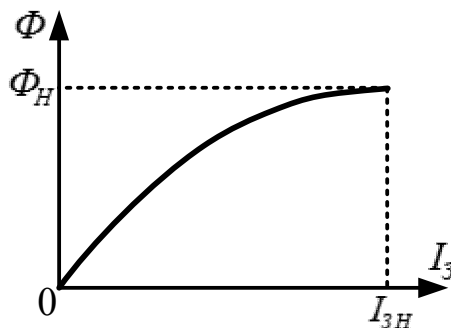


Рис.2.2 Магнітна характеристика ЕМ постійного струму

2.2.2 Зовнішня статична характеристика генератора незалежного збудження

Зовнішня статична характеристика ЕМ постійного струму незалежного збудження – це залежність значення якірної напруги від якірного струму:

$$U_y = f(I_y). \quad (2.5)$$

На рис.2.3 наведена електрична схема ЕМ постійного струму незалежного збудження в режимі генератора, яка дозволяє досліджувати його зовнішню статичну характеристику. Дана схема містить: ЕМ постійного струму М (яка працює в якості генератора); незалежну обмотку збудження ОЗ; приводний двигун (ПД); змінний опір R_H навантаження; змінний опір R_1 (призначений для регулювання струму збудження); номінальна швидкість ω_H , з якою обертається якір генератора. В якості приводного двигуна можуть використовуватися двигун змінного струму (синхронний або асинхронний), двигун внутрішнього згорання (бензиновий або дизельний), гідравлічна, парова або газова турбіна та ін.

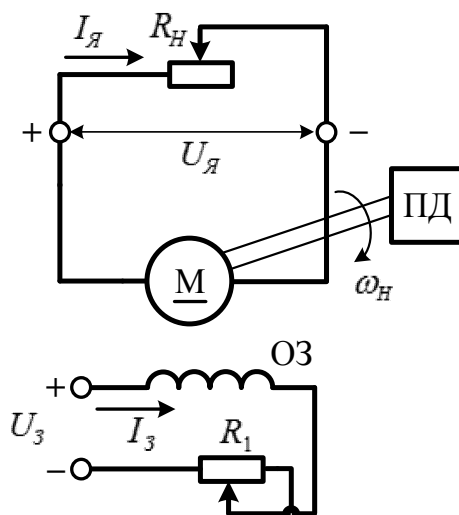


Рис.2.3 Електрична схема генератора постійного струму незалежного збудження

Схема заміщення ЕМ постійного струму в генераторному режимі роботи показана на рис.2.4. Для даної схеми справедливим є співвідношення: $|E| > |U_Я|$, де $U_Я$ та E – відповідно якірня напруга та ЕРС машини.

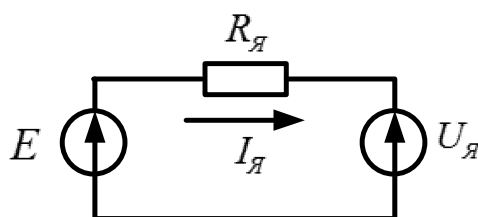


Рис.2.4 Схема заміщення ЕМ постійного струму в генераторному режимі

Як зазначалося раніше, в генераторному режимі роботи ЕМ струм якоря $I_Я$ буде менше нуля: $I_Я < 0$. Тоді для розглядуваного режиму роботи ЕМ рівняння рівноваги напруг буде мати вигляд:

$$U_Я = E - I_Я R_Я, \quad (2.6)$$

З врахуванням другого рівняння системи (2.1) залежність (2.6) прийме вигляд:

$$U_Я = c\Phi\omega_H - I_Я R_Я, \quad (2.7)$$

або для номінального значення магнітного потоку Φ_H генератору:

$$U_{ЯH} = c\Phi_H\omega_H - I_Я R_Я. \quad (2.8)$$

де $R_Я$ – опір якірної обмотки генератора.

В залежностях (2.6) – (2.8) якірний струм генератора розраховується з формули:

$$I_Я = \frac{U_Я}{R_H}, \quad (2.9)$$

де R_H – опір навантаження генератора;

При зміні значення опору R_1 (в схемі на рис.2.3) буде змінюватись струм збудження I_3 і магнітний потік Φ генератора. Згідно магнітної характеристики (рис.2.1) при регулюванні струму збудження I_3 в діапазоні вниз від його номінального значення I_{3H} буде змінюватись також й магнітний потік Φ в діапазоні вниз від його номінального значення Φ_H .

Запишемо з врахуванням залежності (2.6) рівняння рівноваги напруг для чотирьох різних значень магнітного потоку:

$$\left. \begin{aligned} U_{я1} &= E_1 - I_я R_я = c\Phi_1 \omega_H - I_я R_я, \\ U_{я2} &= E_2 - I_я R_я = c\Phi_2 \omega_H - I_я R_я, \\ U_{я3} &= E_3 - I_я R_я = c\Phi_3 \omega_H - I_я R_я, \\ U_{я4} &= E_4 - I_я R_я = c\Phi_4 \omega_H - I_я R_я \end{aligned} \right\}, \quad (2.10)$$

де Φ_1, Φ_2, Φ_3 і Φ_4 – значення магнітного потоку, що створюються в ЕМ при значеннях струмів збудження I_{31}, I_{32}, I_{33} та I_{34} відповідно.

При використанні залежностей з (2.10) побудовані зовнішні статичні характеристики генератора постійного струму незалежного збудження, які наведені на рис.2.5. Зазначені характеристики отримані при зміні опору навантаження R_H і варіюванні опору R_1 . Цим характеристикам на рис.2.5 відповідають наступні співвідношення:

$$\Phi_H > \Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3 > \Phi_4. \quad (2.11)$$

Зниження ΔU якірної напруги генератора під навантаженням:

$$\Delta U = R_я I_я \quad (2.12)$$

визначає нахил його зовнішніх статичних характеристик.

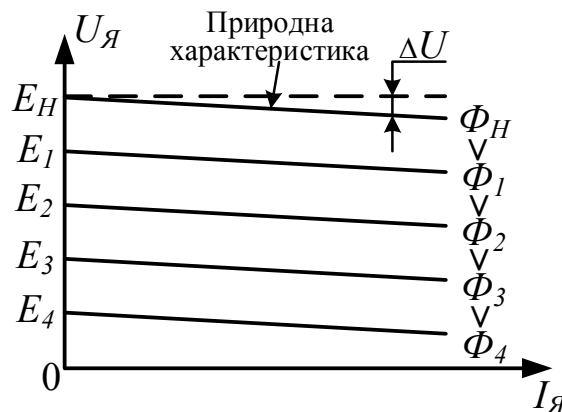


Рис.2.5 Зовнішні статичні характеристики генератора незалежного збудження (при регулюванні значення магнітного потоку Φ)

З аналізу зовнішніх статичних характеристик генератора постійного струму незалежного збудження випливає:

1) регулювання вихідної напруги генератора $U_{\text{я}}$ можливо здійснювати вниз від його номінальної напруги за допомогою регулювання значення його магнітного потоку Φ (при зміні струму збудження I_z);

2) зовнішні характеристики генератора постійного струму представляють собою сімейства похилих прямих;

3) значення напруги холостого ходу генератора (при струмі якоря, рівному нулю) визначається величиною: $c\Phi\omega_H$, а нахил зовнішніх характеристик – значенням падіння напруги з формули (2.12).

2.2.3 Статичні механічні характеристики двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням

Статичні механічні характеристики (СМХ) – це залежність кутової частоти обертання (швидкості) ω від електромагнітного моменту M двигуна в усталених режимах електропривода: $\omega(M)$.

Для аналізу СМХ використаємо основні співвідношення для ЕМ постійного струму, які наведені в (2.1). З першого рівняння цієї системи отримаємо:

$$E = U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (2.13)$$

Останнє рівняння перетворимо з врахуванням рівняння для ЕРС з системи рівнянь (2.1) до вигляду:

$$c\Phi\omega = U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (2.14)$$

Підставивши у співвідношення (2.14) з останнього рівняння системи (2.1) значення для струму якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{c\Phi}, \quad (2.15)$$

отримаємо остаточну залежність для СМХ двигуна постійного струму (ДПС):

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(c\Phi)^2} M = \omega_o - \Delta\omega, \quad (2.16)$$

де $\omega_o = U_{\text{я}}/c\Phi$ – основна швидкість;

$\Delta\omega = \frac{R_{\text{я}}}{(c\Phi)^2} M = \frac{R_{\text{я}}}{c\Phi} I_{\text{я}}$ – відхилення швидкості від основної при зміні моменту машини.

З аналізу залежності (2.16) випливає, що швидкість ω ДПС визначається у вигляді різниці основної швидкості ω_o та відхилення швидкості $\Delta\omega$. При цьому основна швидкість ω_o дорівнює швидкості холостого ходу (при $M=0$) та прямо пропорційно залежить від значення якірної напруги $U_{\text{я}}$ і зворотно пропорційна від значення магнітного потоку Φ двигуна. Відхилення швидкості

$\Delta\omega$ прямо пропорційно залежить від значення електромагнітного моменту M і зворотно пропорційна від квадрату значення магнітного потоку Φ двигуна.

Статичні механічні характеристики електродвигунів поділяються на дві групи: природні та штучні. При цьому природні СМХ для ДПС незалежного збудження отримуються при номінальних значеннях основних параметрів цього двигуна, а саме: при номінальному магнітному потоці Φ_H і при номінальній якірній напрузі $U_{яH}$, а також – при відсутності додаткового резистора в ланцюгу якірної обмотки двигуна.

З врахуванням цього, якщо підтримувати незмінними й рівними їх номінальним значенням напругу якоря $U_я$ і потік Φ машини:

$$\left. \begin{aligned} U_я &= U_{яH} = \text{const}, \\ \Phi &= \Phi_H = \text{const} \end{aligned} \right\}, \quad (2.17)$$

то отримаємо залежність для *природної СМХ* двигуна постійного струму у наступному вигляді:

$$\omega = \frac{U_{яH}}{c\Phi_H} - \frac{R_я M}{(c\Phi_H)^2}, \quad (2.18)$$

яка показана на рис.2.6 представляє собою похилу пряму, що пересікає вісь ординат при номінальній основній швидкості ω_{OH} двигуна, яка розраховується з формули:

$$\omega_{OH} = \frac{U_{яH}}{c\Phi_H}. \quad (2.19)$$

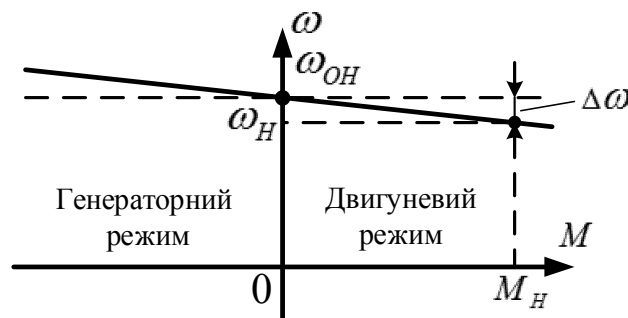


Рис.2.6 Природна СМХ двигуна постійного струму незалежного збудження

2.2.4 Способи регулювання швидкості ДПС незалежного збудження при незмінній якірній напрузі

До основних способів регулювання швидкості ДПС з НЗ при незмінній якірній напрузі (звичайно, що дорівнює номінальній $U_я = U_{яH}$) відносяться:

- а) введення в ланцюг якірної обмотки додаткового резистора $R_{од}$;
- б) ослаблення магнітного потоку Φ двигуна;

На рис. 2.7 наведена електрична схема двигуна постійного струму з незалежним збудженням, в якій передбачена реалізація вище згаданих способів

регулювання швидкості. Ця схема містить: якірну обмотку M двигуна; обмотку збудження $OЗ$; змінні опори $R_{\partial\partial}$ та R_1 . В даній схемі при постійній (рівній номінальній) якірній напрузі: $U_{\text{я}} = U_{\text{яН}} = \text{const}$ здійснюється варіювання значення додаткового опору $R_{\partial\partial}$ (який включено в ланцюг якоря) або опору R_1 (який включено послідовно з обмоткою незалежного збудження та дозволяє змінювати струм I_3 обмотки збудження, а отже ослаблювати магнітний потік Φ двигуна).

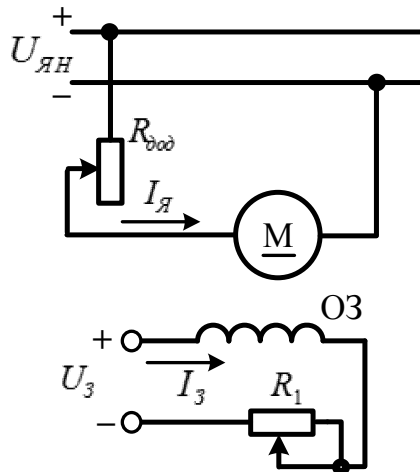


Рис.2.7 Електрична схема двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Для ДПС з незалежним збудженням, у яких номінальне значення напруг якірної обмотки та обмотки збудження рівні між собою ($U_{\text{яН}} = U_{\text{зН}} = \text{const}$), обидві зазначені обмотки, очевидно, можуть бути підключені до одного джерела живлення (наприклад, з напругою $U_{\text{яН}}$ якірної обмотки). Дана схема наведена на рис.2.8 та має назву двигуна постійного струму паралельного збудження.

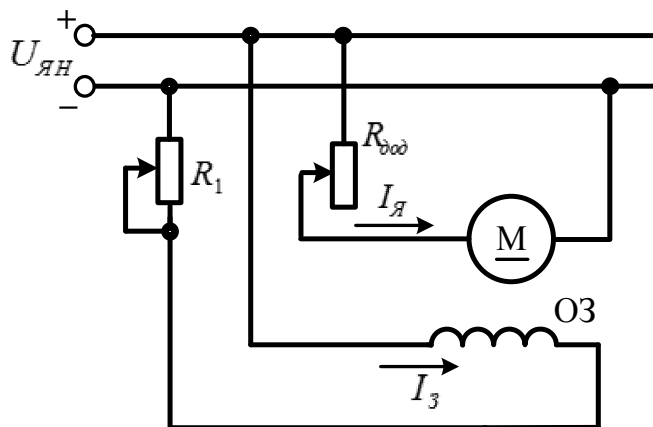


Рис.2.8 Електрична схема двигуна постійного струму з паралельним збудженням.

З раніше отриманого співвідношення (2.16) знайдемо для розглядуваних способів регулювання ДПС незалежного та паралельного збудження аналітичні залежності для розрахунку штучних СМХ

Розрахунок розглянутих вище штучних СМХ виконується з врахуванням (36) із залежності:

$$\omega = \frac{U_{яН}}{c\Phi_H} - \frac{(R_{я} + R_{доd})}{(c\Phi_H)^2} M - \quad (2.20)$$

приведення додаткового резистора $R_{доd}$ в ланцюг обмотки якоря (для $U_{я} = U_{яН}$ та $\Phi = \Phi_H$) або

$$\omega = \frac{U_{яН}}{c\Phi} - \frac{R_{я}}{(c\Phi)^2} M - \quad (2.21)$$

при ослабленні магнітного потоку Φ (для $U_{я} = U_{яН}$ та $R_{доd} = 0$).

Звернемо увагу на те, що *штучні статичні механічні характеристики* – це такі СМХ двигуна, які відповідають відхиленню хоча б одного з його основних параметрів (якірної напруги, магнітного потоку, опору в ланцюзі якоря) від їх номінальних значень.

Із залежностей (2.20) і (2.21) розраховані СМХ для ДПС незалежного збудження при вище розглянутих способах регулювання, які показані на рис. 2.9.

З аналізу побудованих СМХ випливає:

1) спосіб регулювання ДПС з НЗ за допомогою введення в ланцюг якірної обмотки додаткового опору дозволяє регулювати швидкість вниз від номінальної. Недоліком цього способу є збільшені втрати потужності (в додатковому резисторі) та неможливість регулювати швидкість на холостому ході та при малих навантаженнях привода;

2) СМХ двигуна постійного струму при незмінному потоці ($\Phi = \text{const}$) мають вид похилих прямих, тангенс кута нахилу яких (відносно горизонтальної лінії) прямо пропорційний відношенню загального активного опору якоря ($R_{я} + R_{доd}$) до квадрату магнітного потоку (Φ_H). Враховуючи при незмінному магнітному потоці ($\Phi_H = \text{const}$) прямо пропорційну залежність якірного струму $I_{я}$ і електромагнітного моменту M (оскільки $c\Phi_H = \text{const}$), вид електромеханічних залежностей $\omega(I_{я})$ згідно третього рівняння системи (2.1) повністю аналогічний статичним механічним характеристикам;

3) спосіб регулювання ДПС з НЗ шляхом змінення (можливе тільки в сторону зменшення, тобто – послаблення) магнітного потоку ($\Phi \leq \Phi_H$) забезпечує регулювання швидкості вгору від номінально швидкості двигуна (у тому числі – при різних полярностях швидкості). Регулювання є економічним, але при цьому супроводжується прямо пропорційним зменшенням максимального моменту двигуна від величини магнітного потоку;

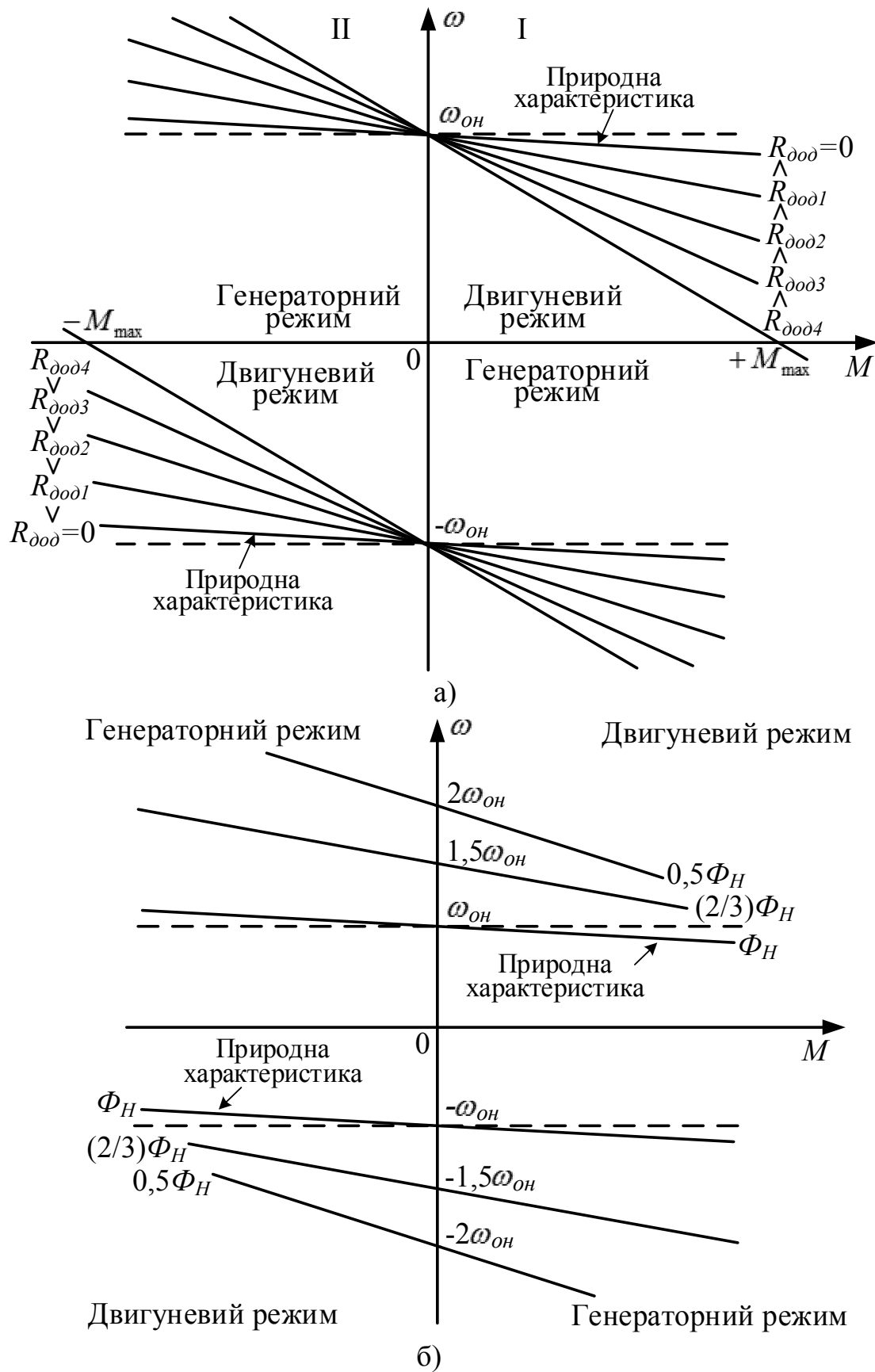


Рис.2.9 Статичні механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням при: а – при введенні додаткового резистора R_{dod} в ланцюг якірної обмотки; б – при ослабленні магнітного потоку Φ

4) при ослабленні магнітного потоку допускається збільшення швидкості двигуна в (1,5-3) рази вище від номінальної (але не вище максимально допустимої для двигуна); при ослабленні магнітного потоку стають менш “жорсткими” штучні СМХ двигуна;

5) при обох вище розглянутих способах регулювання (які характеризуються номінальним значенням якірної напруги) ДПС з незалежним збудженням функціонує: в I та III квадрантах – в двигуновому режимі, а в II та IV квадрантах – в генераторному (гальмівному) режимі, причому при ослабленні магнітного потоку – з поверненням (рекуперацією) енергії до електричної мережі.

2.2.5 Регулювання швидкості ДПС незалежного збудження шляхом зміни якірної напруги

При даному способі змінення якірної напруги здійснюється в діапазоні: $-U_{ян} \leq U_{я} \leq +U_{ян}$ (де $U_{ян}$ – номінальне значення якірної напруги) при відсутності додаткового резистора в ланцюзі якоря і одночасному підтриманні магнітного потоку ДПС на рівні свого номінального значення ($\Phi = \Phi_H$). З врахуванням цього з раніше отриманого співвідношення (2.16) визначимо аналітичну залежність для штучних СМХ:

$$\omega = \frac{U_{я}}{c\Phi_H} - \frac{R_{я}}{(c\Phi_H)^2} M - \quad (2.22)$$

яка відповідає способу регулювання швидкості ДПС незалежного збудження за допомогою зміни якірної напруги.

Розраховані із (2.22) статичні механічні характеристики ДПС приведені на рис.2.10 та представляють собою сімейство похилих прямих. Причому СМХ, що розташовані у верхній напівплощині, відповідають додатній, а що у нижній – від'ємній полярності якірної напруги $U_{я}$.

Аналіз побудованих на рис. 2.10 СМХ для ДПС незалежного збудження при регулюванні якірної напруги свідчить про те, що:

1) зміною якірної напруги забезпечується регулювання швидкості двигуна в діапазоні швидкостей від нуля до номінального значення швидкості двигуна (в тому числі при різних полярностях швидкості);

2) двигун функціонує: в I та III квадрантах – в двигуновому режимі, а в II та IV квадрантах – в генераторному (гальмівному) режимі з поверненням (рекуперацією) енергії до електричної мережі;

3) перевагами даного способу є економічність регулювання швидкості і висока якість (підвищені швидкодія і точність, розширений діапазон) регулювання швидкості;

4) недоліком даного способу є необхідність в наявності регульованого джерела якірної напруги (наприклад тиристорного перетворювача постійного струму або електричного генератора постійного струму з приводним двигуном), що потребує додаткових капітальних витрат і приводить до суттєвого здороження електропривода.

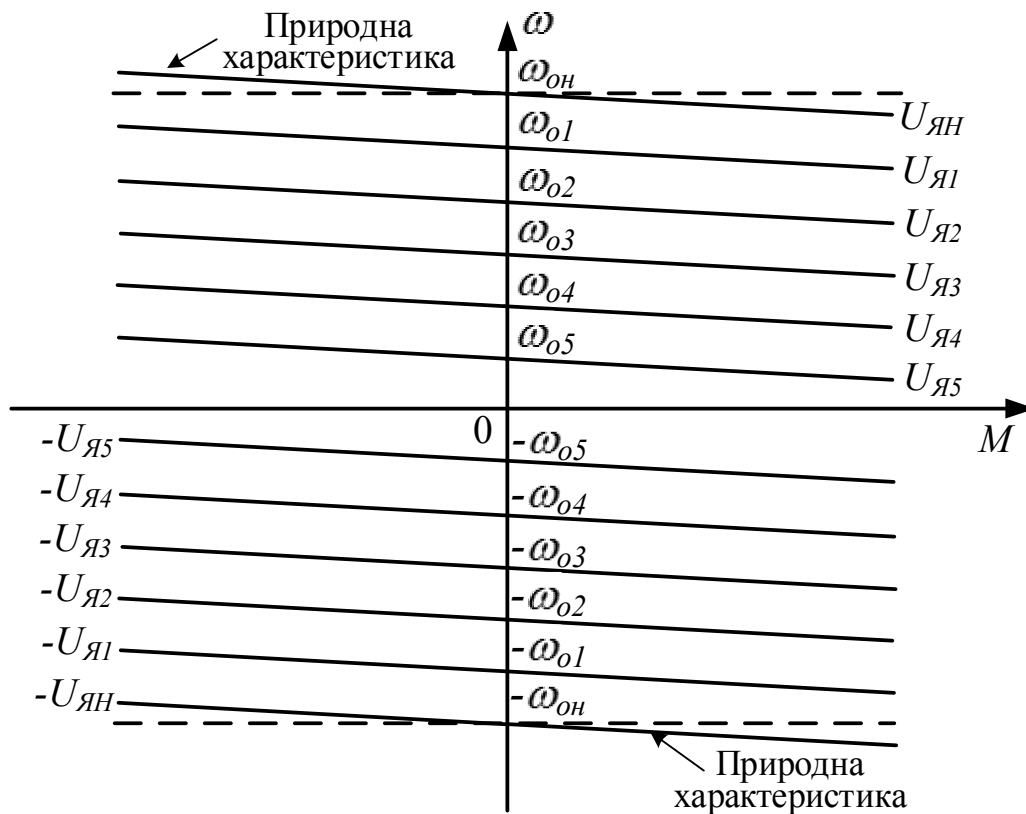


Рис.2.10 Статичні механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням при зміні якірної напруги

Контрольні питання

1. Зміну яких параметрів характеризує магнітна характеристика двигуна постійного струму та який її графічний вид?
2. Сутність зовнішньої статичної характеристики генератора постійного струму незалежного збудження, відповідні їй аналітична та графічна залежності. електрична схема генератора постійного струму незалежного збудження та її еквівалентна схема заміщення.
3. Яким чином та в якому діапазоні регулюється вихідна напруга електричного генератора постійного струму незалежного збудження та відповідна цьому зовнішня статична характеристика даного генератора?
4. Взаємозв'язок яких параметрів характеризує статична механічна характеристика (СМХ) електродвигуна? Вивід природної СМХ для двигуна постійного струму (ДПС) незалежного збудження, її аналітичний та графічний вид.
5. Способи регулювання швидкості ДПС незалежного збудження при незмінній якірній напрузі (перерахувати способи та привести відповідні електричні схеми електропривода, діапазон регулювання швидкості).
6. Штучні СМХ для ДПС незалежного збудження при введенні додаткового резистора в ланцюг обмотки якоря (аналітичний та графічний вид

СМХ, діапазон регулювання швидкості, електрична схема регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

7. Штучні СМХ для ДПС незалежного збудження при ослабленні магнітного потоку двигуна (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, електрична схема регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

8. Штучні СМХ для ДПС незалежного збудження при регулюванні якірної напруги (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, електрична схема регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

2.3 Статичні механічні характеристики ДПС з послідовним та змішаним збудженням

Окрім розглянутих раніше ДПС з незалежним збудженням існують інші типи двигунів постійного струму: з послідовним та змішаним збудженням, які знайшли основне застосування в тягових електроприводах на електротранспорті (трамвай, тролейбус, електропоїзд).

2.3.1 СМХ двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Електрична схема ДПС з послідовним збудженням наведена на рис. 2.11 (де $R_{доd}$ – додатковий резистор). У даного двигуна обмотка збудження ОЗ намотана електричним проводом збільшеного перерізу (розрахована на номінальний якірний струм двигуна) та включена послідовно з обмоткою якоря і в ній протікає струм якоря $I_{я}$.

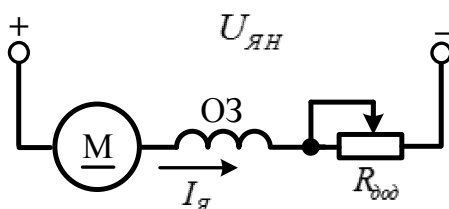


Рис.2.11 Електрична схема ДПС з послідовною обмоткою збудження

Внаслідок цього магнітний потік Φ є нелінійною функцією від струму якоря, яку приведено на рис.2.12. Нелінійність зумовлена насиченням сталі осердя двигуна.

Аналітична апроксимація нелінійної магнітної характеристики $\Phi(I_{я})$ дуже складна, тому для спрощення припустимо, що магнітний потік Φ залежить прямо пропорційно від якірного струму $I_{я}$ (як показано на рис. 2.12 пунктиром):

$$\Phi \approx \kappa_1 I_{я}, \quad (2.23)$$

де κ_1 – постійний коефіцієнт.

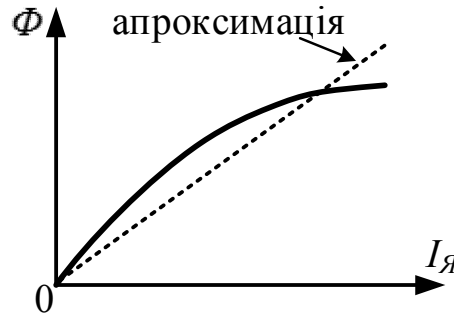


Рис.2.12 Залежність струму якоря від магнітного потоку для ДПС послідовного збудження

З урахуванням формули (2.23) отримаємо з останнього рівняння системи (2.1) спрощене співвідношення для розрахунку електромагнітного моменту M зазначеного ДПС з послідовною ОЗ:

$$M \approx c\Phi I_{\text{Я}} = (ck_1)I_{\text{Я}}^2 = \kappa_2 I_{\text{Я}}^2, \quad (2.24)$$

де

$$\kappa_2 = ck_1. \quad (2.25)$$

З першого рівняння системи (2.1) напишемо рівняння рівноваги напруг для ДПС послідовного збудження:

$$U_{\text{ЯН}} = E + I_{\text{Я}}(R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}}) = c\Phi\omega + I_{\text{Я}}(R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}}), \quad (2.26)$$

з якого знайдемо швидкість ω :

$$\omega = \frac{U_{\text{ЯН}}}{c\Phi} - \frac{(R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}})I_{\text{Я}}}{c\Phi}, \quad (2.27)$$

де $R = R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}}$ – сумарний опір ланцюга обмотки якоря.

Підставивши в останній вираз умову (2.23), отримаємо:

$$\omega = \frac{U_{\text{ЯН}}}{(ck_1)I_{\text{Я}}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}}}{ck_1} = \frac{U_{\text{ЯН}}}{\kappa_2 I_{\text{Я}}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}}}{\kappa_2}, \quad (2.28)$$

Підставимо в (2.28) значення якірного струму, яке знайдене із (2.24), у вигляді:

$$I_{\text{Я}} = \sqrt{M/\kappa_2}. \quad (2.29)$$

В результаті цього отримаємо остаточний вигляд аналітичної залежності для статичних механічних характеристик ДПС з послідовним збудженням:

$$\omega = \frac{U_{\text{ЯН}}}{\kappa_2 \sqrt{M/\kappa_2}} - \frac{R}{\kappa_2} = \frac{U_{\text{ЯН}}}{\sqrt{\kappa_2 M}} - \frac{R_{\text{Я}} + R_{\text{доо}}}{\kappa_2}. \quad (2.30)$$

За допомогою останньої залежності побудовані СМХ для ДПС послідовного збудження, які наведені на рис.2.13. Дані характеристики отримані при варіюванні значення додаткового опору $R_{\text{доо}}$.

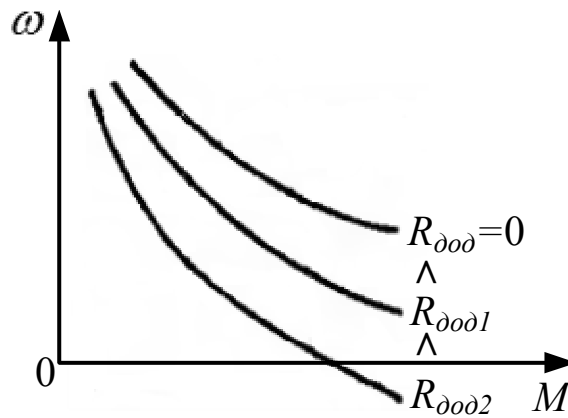


Рис.2.13 Статичні механічні характеристики для ДПС послідовного збудження

Аналіз побудованих на рис.2.13 СМХ для ДПС послідовного збудження показує, що:

1) характеристики представляють собою гіперболічного вигляду криві, які показують, що момент двигуна зменшується із збільшенням швидкості та навпаки;

2) при зменшенні моменту до нуля ($M = 0$) швидкість ω двигуна – прагне до нескінченності (при цьому вісь ординат є асимптотою);

3) на практиці момент M двигуна не може дорівнювати нулю (через наявність механічного моменту опору на валу та втрат на тертя), але навіть при зазначених малих ненульових значеннях моменту швидкість двигуна може перевищити його максимально припустиме значення та пошкодити підшипники й обмотку двигуна. При цьому швидкість може в (5-6) разів перевищити номінальну швидкість двигуна. Тому для ДПС з послідовним збудженням режим роботи без навантаження (на холостому ході) неприпустимий й слід прийняти заходи для захисту двигуна від даного режиму (тобто виключити неприпустимий режим розгону двигуна значно вище номінального значення швидкості, якій називається роботою двигуна “в рознос”);

4) можлива робота в I і IV квадрантах, що відповідає двигуневому режиму роботи та режиму гальмування (противвімкненням) відповідно.

2.3.2 СМХ двигуна постійного струму зі змішаним збудженням

ДПС зі змішаним збудженням, електрична схема якого наведена на рис.2.14, одночасно містить: обмотку незалежного (паралельного) збудження й обмотку послідовного збудження, а результуючий магнітний потік Φ в машині створюється у вигляді суми магнітних потоків створюваних зазначеними обмотками:

$$\Phi = \Phi_{\text{пар}} + \Phi_{\text{посл}}. \quad (2.31)$$

Внаслідок нелінійної функції змінення магнітного потоку від струмів I_z і I_a складно отримати аналітичні залежності для СМХ змішаного збудження.

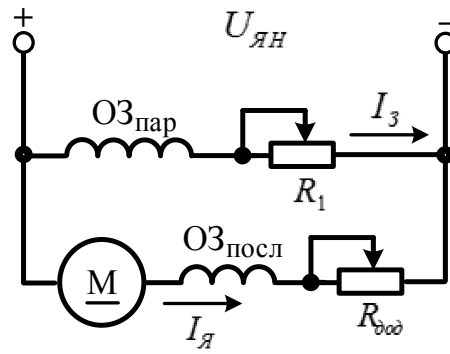


Рис.2.14 Електрична схема ДПС змішаного збудження

Але при цьому відносно просто знаходиться значення основної швидкості в режимі холостого ходу (при $M = 0$ або $I_{Я} = 0$) аналогічно ДПС з незалежним збудженням:

$$\omega_0 = \frac{U_{ЯН}}{c\Phi_{пар}}, \quad (2.32)$$

оскільки при цьому складова магнітного потоку $\Phi_{посл} = 0$.

Приклад СМХ для ДПС змішаного збудження показано на рис.2.15 для різних співвідношень складових магнітних потоків, створюваних обмотками паралельного й послідовного збудження:

$$\frac{\Phi_{пар1}}{\Phi_{посл1}} < \frac{\Phi_{пар2}}{\Phi_{посл2}}. \quad (2.33)$$

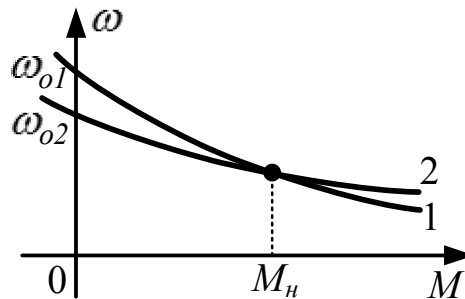


Рис.2.15 Статичні механічні характеристики для ДПС змішаного збудження

Вид кривих 1 і 2 СМХ, показаних на рис.2.15, відповідає співвідношенням складових магнітного потоку $\Phi_{пар1}/\Phi_{посл1}$ та $\Phi_{пар2}/\Phi_{посл2}$ з формули (2.33).

Аналіз СМХ для ДПС зі змішаним збудженням свідчить про те, що:

1) СМХ такого двигуна мають гіперболічний вид (схожий на ДПС послідовного збудження), при якому зі збільшенням значення моменту M швидкість ω двигуна зменшується;

2) на відміну від ДПС послідовного збудження в ДПС змішаного збудження можлива (завдяки наявності обмотки паралельного збудження) робота двигуна на холостому ході (при $M = 0$);

3) функціонування ДПС змішаного збудження здійснюється: в I квадранті – в двигуновому режимі, у II – в генераторному режимі з поверненням (рекуперацією) енергії до електричної мережі, в IV квадранті – в режимі гальмування противімкненням.

Насамкінець відмітимо, що всі раніше розглянуті СМХ двигунів постійного струму з послідовним та змішаним збудженням розглянуті при незмінному значенні (яке дорівнює номінальному) якірної напруги: $U_{\text{я}} = U_{\text{яH}} = \text{const}$.

Контрольні питання

1. Природна та штучна СМХ для двигуна постійного струму з послідовним збудженням (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, електрична схема регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

2. Природна та штучна СМХ для двигуна постійного струму зі змішаним збудженням (вихідні аналітичні залежності, графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, електрична схема регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

2.4 Електропривод постійного струму за системою “генератор-двигун”

В електроприводі постійного струму, який виконано за системою “генератор-двигун” (“Г-Д”), використовується двигун постійного струму незалежного збудження. На рис.2.16 наведена електрична схема системи “генератор-двигун”, яка містить: приводний двигун генератора ПДГ; генератор постійного струму Г; двигун постійного струму Д (який приводить у рух через передавальний пристрій ПП виконавчий орган робочої машини РМ); обмотку збудження генератора ОЗГ; обмотку збудження двигуна ОЗД; потенціометри R_1 і R_2 , які слугують для регулювання відповідно струмів в обмотках збудження генератора ($I_{\text{зГ}}$) і двигуна ($I_{\text{зД}}$); нормально-замкнені K_1 , K_3 і нормально-розімкнені K_2 , K_4 контакти реле К (яке задає полярність струму збудження $I_{\text{зГ}}$ генератора); регульоване джерело постійної напруги РДПН.

На практиці дуже часто у схемі “Г-Д” обмотки ОЗГ генератора та ОЗД двигуна живлять не безпосередньо від потенціометрів R_1 та R_2 , а – через проміжні електромашинні підсилювачі (ЕМУ), які встановлюються на тому ж валу з генератором Г (які є малопотужними генераторами постійного струму, що мають коефіцієнт підсилення: $K_{\text{ЕМУ}} = 2000-10000$). В останні роки ЕМУ в системах “Г-Д” замінюють на тиристорні перетворювачі постійного струму, які характеризуються підвищеною надійністю та зменшеними експлуатаційними витратами.

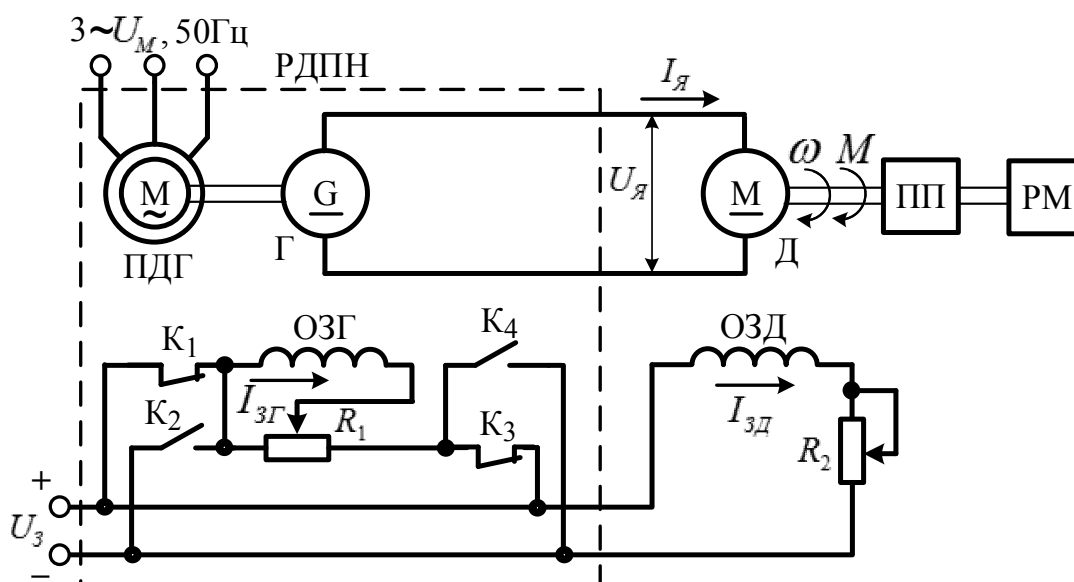


Рис.2.16 Електрична схема системи “генератор-двигун”

Схема на рис.2.16 функціонує наступним чином. Приводний двигун генератора ПДГ обертає якор генератора Г постійного струму з незмінною швидкістю: $\omega_H = \text{const}$ (близькій до номінальної частоти генератора). В якості ПДГ використовується на практиці асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. При замкнених контактах K_1, K_3 реле К на потенціометр R_1 подається напруга, яка забезпечує додатну полярність струму збудження генератора: $I_{3Г} > 0$. Відповідно в генераторі створюється додатній напрямок потоку $\Phi_G > 0$ генератора. Величина струму збудження $I_{3Г}$ і, отже, потоку генератора Φ_G регулюється потенціометром R_1 . При цьому на якорі генератора створюється напруга, значення якої визначається з формули:

$$U_{яГ} = E_G - I_{яГ} R_{яГ} = c \Phi_G \omega_H + I_{яГ} R_{яГ}, \quad (2.34)$$

де $I_{яГ}$ та E_G – струм та електрорушійна сила генератора Г відповідно;

$R_{яГ}$ та c – опір обмотки якоря та конструктивна постійна генератора відповідно.

З останнього рівняння випливає, що варіювання потоку генератора ($\Phi_G = \text{var}$) призведе до змінення напруги якоря ($U_{яГ} = \text{var}$).

Для зміни полярності якорної напруги $U_{яГ}$ генератора Г розмикають контакти K_1, K_3 і замикають контакти K_2, K_4 реле К, в результаті чого змінюється на протилежний напрямок протікання струму збудження $I_{3Г} < 0$ і потоку $\Phi_G < 0$ генератора, а, отже, й ЕРС E_G генератора:

$$E_G = c \Phi_G \omega_H < 0, \text{ при } \Phi_G < 0. \quad (2.35)$$

Поки напруга на виході генератора не досягне максимального (номінального) значення

$$|U_{яГ}| < U_{яН}, \quad (2.36)$$

в обмотку збудження двигуна ОЗД задається номінальний струм збудження ($I_{30} = I_{30н}$), який забезпечує створення, в свою чергу, номінального значення потоку двигуна:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\deltaн} \text{ при } U_{я} < U_{ян}. \quad (2.37)$$

При такому керуванні (що відповідає першій зоні швидкісного діапазону) штучні статичні механічні характеристики двигуна Д незалежного збудження описуються співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{U_{я}}{c\Phi_{\deltaн}} - \frac{R_{я}}{(c\Phi_{\deltaн})^2} M = \omega_0 - \Delta\omega, \\ \omega_0 &= \frac{U_{я}}{c\Phi_{\deltaн}}, \\ \Delta\omega &= \frac{R_{я}}{(c\Phi_{\deltaн})^2} M - \frac{R_{я}}{c\Phi_{\deltaн}} I_{я} \end{aligned} \right\}, \quad (2.38)$$

де ω_0 – основна швидкість двигуна;

$\Delta\omega$ – відхилення швидкості двигуна від основної швидкості при зміні його моменту.

В даних співвідношеннях варіюється значення якірної напруги $U_{я}$ двигуна Д (яке дорівнює значенню якірної напруги генератора Г). При зміні якірної напруги $U_{я}$ двигуна розраховані та побудовані на рис. 2.17 статичні механічні характеристики двигуна Д для першої зони швидкісного діапазону: $-\omega_{0н} \leq \omega \leq +\omega_{0н}$ при $\Phi_{\delta} = \Phi_{\deltaн} = \text{const}$.

В другій зоні (після досягнення якірною напругою свого номінального значення: $U_{я} = U_{ян}$), впливаючи на резистор R_2 , здійснюється зменшення струму збудження $I_{3д}$ і магнітного потоку Φ_{δ} двигуна.

При цьому аналогічно формулі (2.16) статичні механічні характеристики двигуна Д в другій зоні швидкісного діапазону описуються аналітичною залежністю:

$$\omega = \frac{U_{я}}{c\Phi_{\delta}} - \frac{R_{я}}{(c\Phi_{\delta})^2} M = \omega_0 - \Delta\omega \quad (2.39)$$

та відповідає ослабленню магнітного потоку двигуна ($\Phi_{\delta} < \Phi_{\deltaн}$).

З аналізу побудованих для схеми “генератор-двигун” статичних механічних характеристик двигуна Д на рис.2.17 випливає:

1) СМХ в першій зоні (при $\Phi_{\delta} = \Phi_{\deltaн} = \text{const}$) представляють собою сімейство похилих паралельних прямих з нахилом, який дорівнює нахилу природної механічної характеристики ДПС з НЗ;

2) в другій зоні (при $\omega > \omega_н$ та $\Phi_{\delta} < \Phi_{\deltaн}$) СМХ представляють собою похилі прямі зі збільшеним кутом нахилу при послабленні магнітного потоку (СМХ стають менш жорсткими у порівнянні з природною механічною характеристикою ДПС з НЗ);

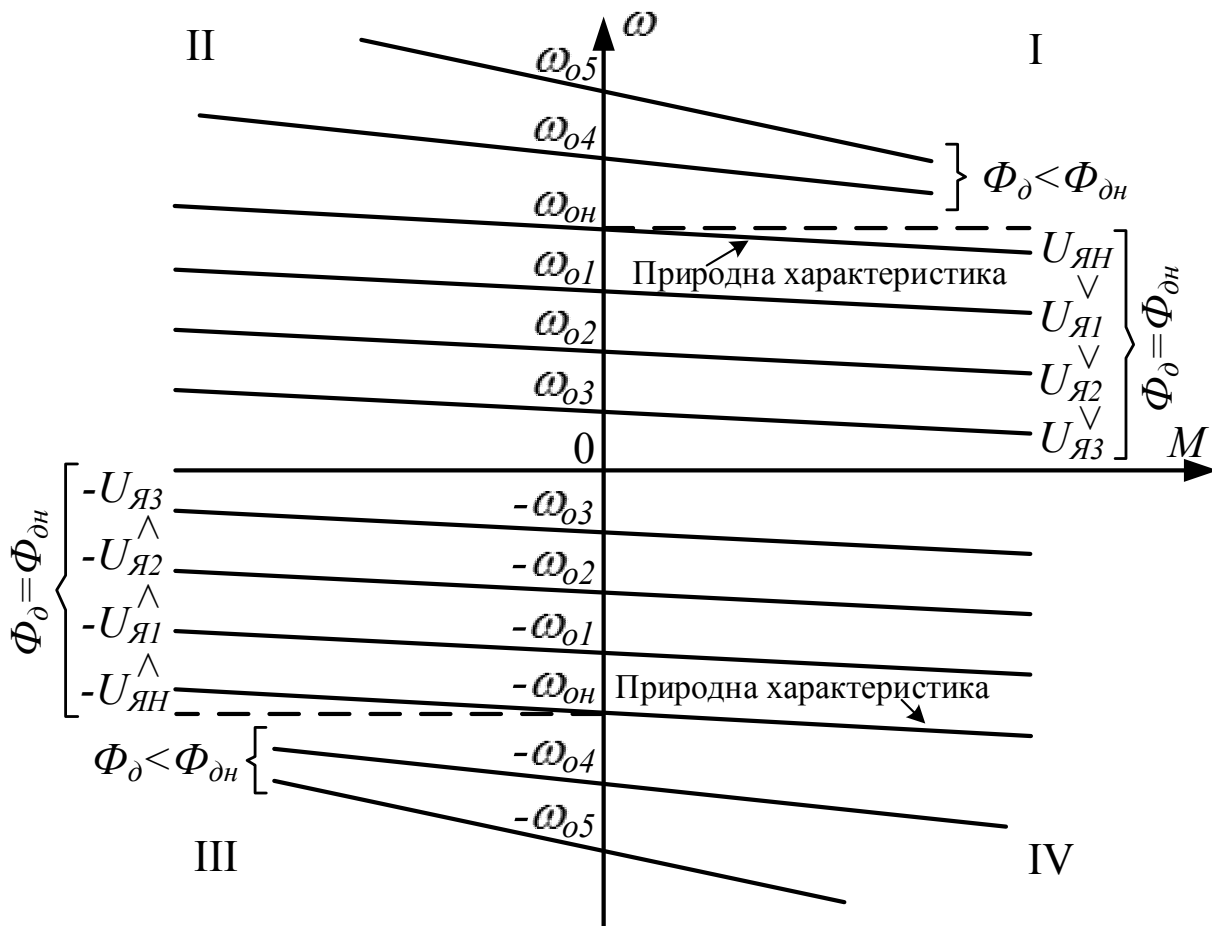


Рис.2.17 Статичні механічні характеристики двигуна Д в системі “генератор-двигун” (при $\Phi_\delta = \Phi_{\deltaн}$ – для першої зони; при $\Phi_\delta \leq \Phi_{\deltaн}$ – для другої зони швидкісного діапазону)

3) при регулюванні двигуна Д в системі “генератор-двигун” можлива робота у всіх чотирьох квадрантах механічної діаграми: в I і III квадрантах – в двигуневому режимі, в II і IV квадрантах – в генераторному (гальмівному) режимі з рекуперацією енергії до електричної мережі.

Основними перевагами системи “Г-Д” є:

- великий діапазон й плавність регулювання швидкості;
- висока жорсткість СМХ і їх лінійність;
- можливість роботи в чотирьох квадрантах механічної діаграми, в тому числі в II і IV – з рекуперацією енергії до мережі;

До недоліків системи “Г-Д” відносяться:

- збільшена (потроєна) встановлена потужність електричних машин (однакової потужності: ПДГ, Г й Д) і через те – збільшенні маса, габарити та вартість електропривода;
- шум електричних машин при роботі;
- підвищенні експлуатаційні витрати при обслуговуванні (через обслуговування колекторів генератора та двигуна);
- інерційність процесу регулювання (пов’язана з індуктивністю обмотки збудження генератора).

Зазначені недоліки системи “Г-Д” відсутні в тиристорних електроприводах постійного струму.

Контрольні питання

1. Електрична схема регулювання ДПС незалежного збудження за системою „генератор – двигун”(назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).
2. Штучні СМХ для електропривода постійного струму за системою „генератор – двигун” (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

2.5 Тиристорний електропривод постійного струму

Тиристорний електропривод (ТЕП) постійного струму має кращі технічні (збільшену швидкодію), масо-габаритні та вартісні показники у порівнянні з раніше розглянутою системою “Г-Д” та дозволяє економічно (з малими втратами потужності) регулювати якірну напругу постійного струму.

У якості регульованого джерела постійної напруги в цьому електроприводі застосовуються нереверсивні або реверсивні тиристорні перетворювачі (ТП), виконанні на основі трифазної нульової або мостової схем керованого випрямляча (КВ). Зазначені схеми ТП представлені на рис.2.18 і рис.2.19, де L_{co} – струмообмежуючі реактори; L_z – згладжуючий реактор; $V1...V6$ – тиристири; В та Н – зустрічно паралельно підключені нереверсивні тиристорні керовані випрямлячі з напрямками протікання вихідного струму “Вперед” і “Назад” відповідно; М – якірна обмотка ДПС незалежного збудження; ОЗ – обмотка збудження.

Особливості схем на рис.2.18 та рис.2.19:

- 1) нереверсивний ТП забезпечує один напрямок протікання якірного струму, а реверсивний – два напрямки протікання якірного струму машини;
- 2) в нульовій схемі реверсивного ТП і в мостовій схемі реверсивного ТП відповідно групи та мости тиристорів “В” й “Н” (“Вперед” і “Назад”) проводять струм по чергові – в залежності від бажаного напрямку струму в якорі. Це досягається подачею імпульсів керування на потрібну групу або міст реверсивного ТП (на другий міст імпульси керування тиристорами не подаються та він знаходиться в закритому стані);

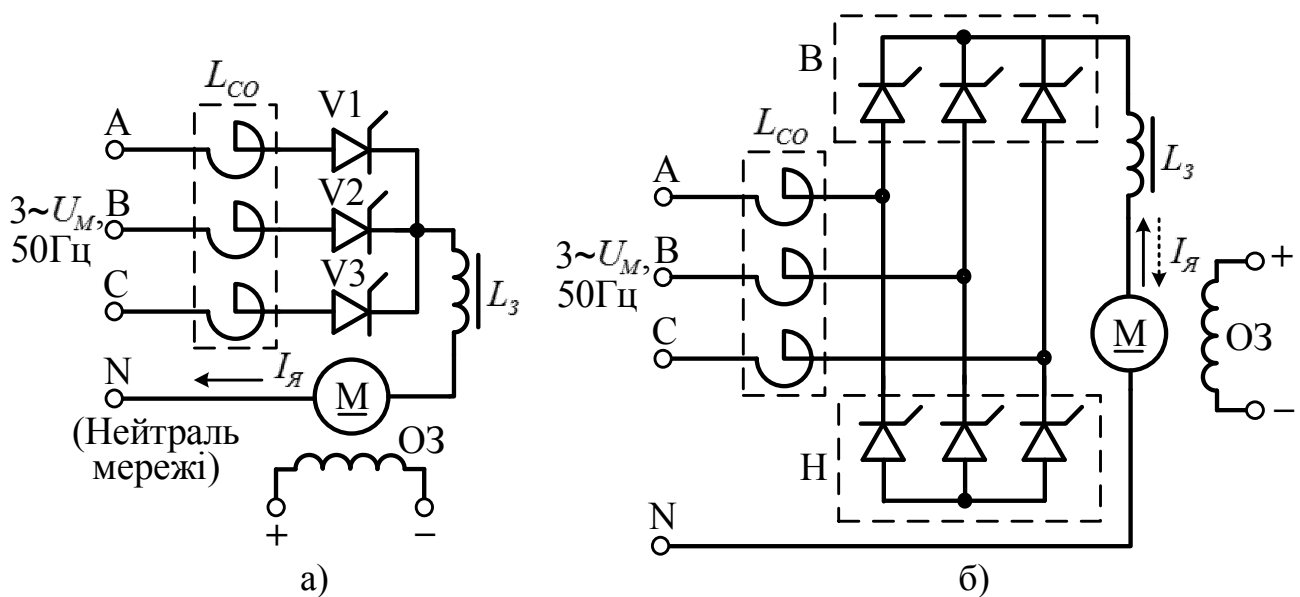


Рис.2.18 Трифазні нульові схеми керованих випрямлячів:
а – нереверсивна; б – реверсивна

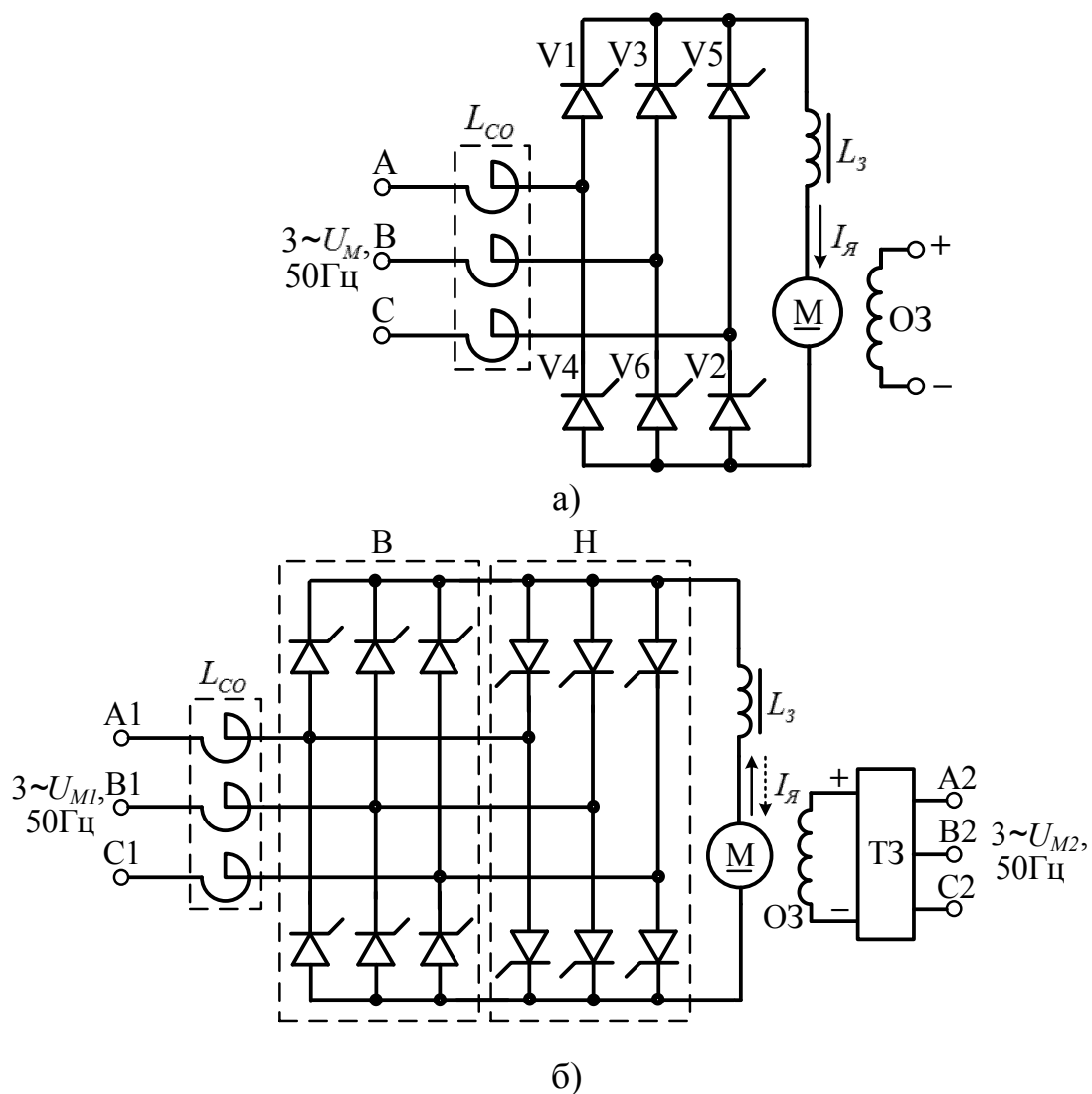


Рис.2.19 Трифазні мостові схеми керованих випрямлячів:
а – нереверсивна; б – реверсивна

3) струмообмежуючі реактори L_{co} служать для обмеження струмів короткого замикання (на рівні менше максимального ударного струму через тиристор і нижче струмової комутаційної здатності автоматичного вимикача);

4) згладжуючий реактор L_3 служить для зменшення пульсацій якірного струму двигуна (які повинні бути не більше 3-5% від номінального якірного струму, щоб була стійка комутація струму в колекторі машини), оскільки вихідна напруга КВ містить пульсації;

5) нульові схеми ТП застосовуються для малих потужностей ЕП – менше 10-20кВт та потребують підключення до чотирьохпроводної мережі (яка містить нейтральний вивід N). Недоліком даної схеми – є наявність постійних складових в фазних струмах і нейтралі. Мостові схеми найбільш розповсюджені та застосовуються для ЕП потужністю вище 10-20кВт;

6) з урахуванням одної полярності вихідного струму нереверсивні тиристорні ЕП дозволяють здійснювати роботу ЕП постійного струму тільки в двох квадрантах (I і IV) механічної діаграми, реверсивні ТП – у всіх чотирьох квадрантах зазначеної механічної діаграми;

7) реверсивні ТП забезпечують повернення (рекуперацію) електричної енергії при гальмуванні ЕП в електричну мережу живлення;

8) для формування імпульсів керування тиристорами КВ до складу реверсивного та нереверсивного ТП входить система імпульсно-фазового керування (СІФК).

На рис. 2.20 наведена функціональна схема реверсивного тиристорного електропривода постійного струму, що містить: тиристорний перетворювач ТП (до складу якого входять тиристорні мости “В” і “Н”, що забезпечують протікання струму через якір двигуна в обох напрямках); тиристорний збудник ТЗ; логічний перемикаючий пристрій ЛПП (що здійснює вибір моста); системи імпульсно-фазового керування СІФК-В і СІФК-Н; систему автоматичного керування САК.

Система автоматичного керування формує сигнали керування на вибір тиристорного моста ТП, що проводить, та відкриття його тиристорів, а також – сигналів керування на відкриття тиристорів збудника ТЗ. У відповідності з зазначеними сигналами керування САК тиристорний перетворювач ТП формує задану якірну напругу $U_{я}$ двигуна постійного струму, а тиристорний збудник – необхідний струм збудження (що визначає магнітний потік Φ двигуна).

Статичні механічні характеристики ДПС незалежного збудження в тиристорному електроприводі зі схеми на рис.2.20 повністю ідентичні тим, що приведені на рис. 2.17 для системи “генератор-двигун”.

В теперішній час електропривод постійного струму є найбільш економічним і якісним (за швидкодією, точністю, діапазону регулювання швидкості) з усіх нині існуючих типів електроприводів постійного струму.

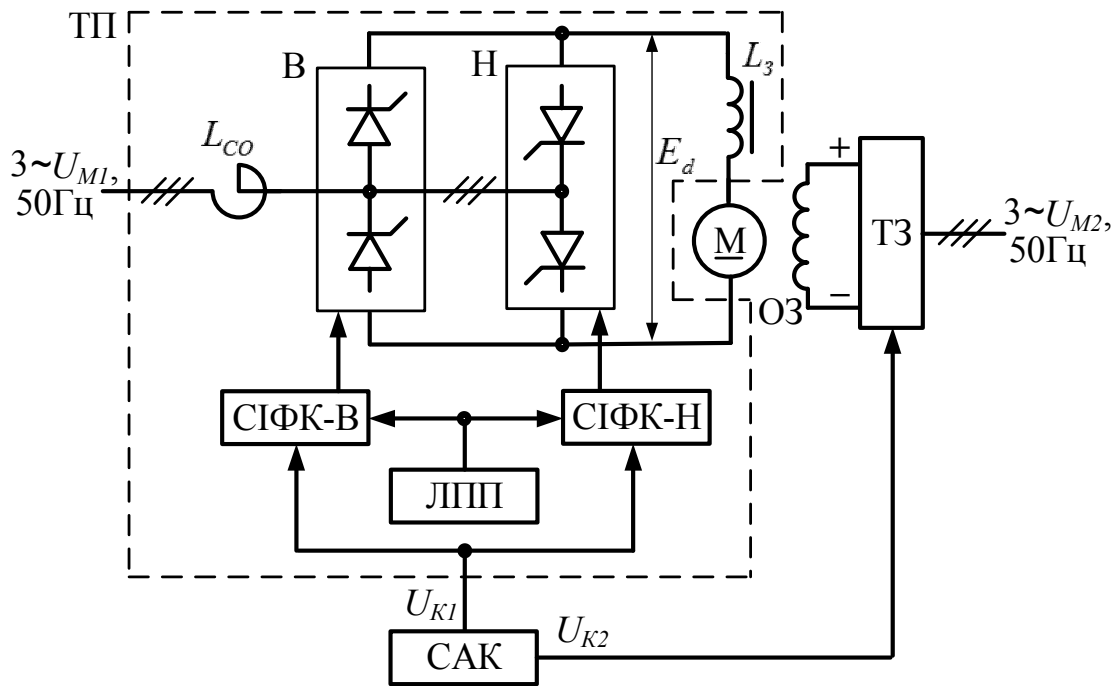


Рис.2.20 Функціональна схема реверсивного тиристорного електропривода постійного струму

Контрольні питання

1. Функціональна схема реверсивного тиристорного електропривода постійного струму (назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).
2. Електричні схеми трифазних реверсивних та нереверсивних тиристорних перетворювачів постійного струму (назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).
3. Штучні СМХ двигуна постійного струму незалежного збудження в реверсивному тиристорному електроприводі постійного струму (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

2.6 Системи автоматичного керування тиристорними електроприводами постійного струму

В сучасних тиристорних електроприводах постійного струму знаходять застосування замкнуті (з автоматичними регуляторами й зворотними зв'язками) системи автоматичного керування (САК), які створюються на основі теорії й апаратних засобів автоматичного регулювання. До основних видів САК для тиристорних ЕП постійного струму відносяться:

- а) зі струмовою “відсічкою” (або підсумовуючим підсилювачем);
- б) з підпорядкованим регулюванням.

2.6.1 Тиристорний електропривод постійного струму зі струмовою “відсічкою” (або підсумовуючим підсилювачем)

Функціональна схема тиристорного ЕП, в якому САК створена зі струмовою “відсічкою”, наведена на рис.2.21. Вона містить: двигун постійного струму ДПС незалежного збудження; давач ДС якірного струму $I_{я}$; тиристорний перетворювач ТП постійного струму; регулятор швидкості РШ; давач швидкості ДШ; суматор С (в якому заштриховані сегменти позначають математичну операцію віднімання) та нелінійний елемент НЕ. На цьому рисунку також використовуються наступні позначення: ω^* та ω – задане та фактичне значення швидкості відповідно; U_K – вхідний сигнал керування тиристорним перетворювачем ТП; $U_{я}$ – якірна напруга ДПС (яка дорівнює постійній складовій вихідній напруги ТП); Δ – вхідний сигнал нелінійного елемента НЕ.

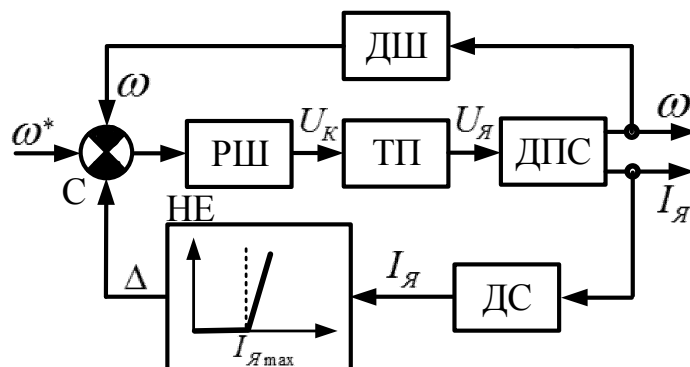


Рис.2.21 Функціональна схема тиристорного ЕП, в якому САК створена зі струмовою “відсічкою”

Розглянемо два можливих режиму функціонування цього електроприводу: сталий та розгону (або перевантаження за струмом).

При функціонуванні ЕП в сталому режимі без струмового перевантаження (коли $I_{я} < I_{я\max}$) вихідний сигнал нелінійного елемента дорівнює нулю: $\Delta = 0$ (тобто нелінійний елемент НЕ не впливає на роботу САК). При цьому регулятор швидкості РШ впливає своїм вихідним сигналом U_K на вхід ТП таким чином, щоб підтримувалась на вході згаданого регулятора різниця: $\Delta\omega = \omega^* - \omega$ такою, що дорівнює нулю ($\Delta\omega \approx 0$). Якщо ця умова виконується, то в сталому режимі автоматично регулятором РШ підтримується задане значення швидкості: $\omega = \omega^*$ двигуна.

Розглянемо другий режим, який, наприклад, міг виникнути через прикладення великого моменту опору, при якому струм $I_{я}$ досяг значення $I_{я\max}$. В цьому випадку на виході нелінійного елемента НЕ з'являється ненульовий сигнал $\Delta \neq 0$, який віднімається в суматорі С від сигналу заданої швидкості ω^* й зменшує (вплив на регулятор швидкості РШ) сигнал керування U_K на вході ТП. Внаслідок чого зменшується вихідна напруга ТП та напруга

$U_{\text{я}}$ на якорі ДПС, через це швидкість двигуна знижується за характеристикою, що показана на рис. 2.22. Ця характеристика називається “екскаваторною”, оскільки у перше була застосована для обмеження якірного струму в тиристорному ЕП постійного струму, встановленого на приводі підйому екскаватора. Кут α нахилу падаючої ділянки екскаваторної характеристики залежить від кута нахилу характеристики нелінійного елементу НЕ. Якщо у зазначеному елементі НЕ кут α дорівнює 90° , то падаюча частина СМХ привода буде вертикальною. Цим обмежується максимальний якірний струм $I_{\text{я}}$ двигуна на рівні: $|I_{\text{я}}| \leq I_{\text{я max}}$, а електромагнітного моменту M – на рівні: $|M| \leq M_{\text{max}} = c\Phi_{\text{H}} I_{\text{я max}}$, де $I_{\text{я max}} \approx 2,5 I_{\text{яH}}$ – максимально припустиме значення якірного струму ДПС (виходячи з нормальної комутації якірного струму в колекторі), що приводиться в паспортних даних двигуна; Φ_{H} та c – номінальне значення магнітного потоку та конструктивна постійна ДПС незалежного збудження відповідно.

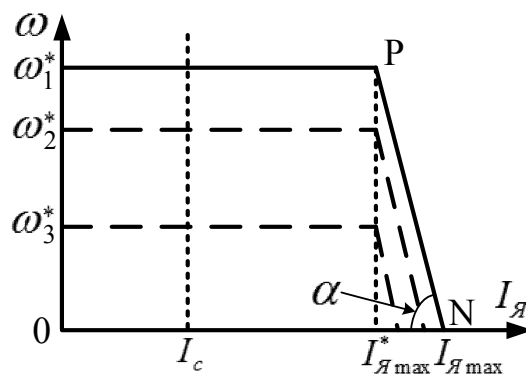


Рис.2.22 “Екскаваторні” статичні механічні характеристики тиристорного ЕП, в якому застосовується САК зі струмовою “відсічкою”

Аналогічно здійснюється функціонування тиристорного ЕП в схемі на рис.2.22 в режимі початкового розгону, коли різниця швидкостей $\Delta\omega = \omega^* - \omega$ при зупиненому двигуні велика. При цьому збільшуються на виході регулятора швидкості РШ сигнал $U_{\text{К}}$, а на виході ТП – якірна напруга $U_{\text{я}}$ до таких значень, при яких струм якоря досягає $I_{\text{я max}}$. Після цього нелінійний елемент НЕ своїм вихідним сигналом діє на вхід суматора С так, що розгін відбувається за характеристикою NP (яка показана на рис.2.22), при якому виконується обмеження якірного струму менше максимально припустимого значення. Після завершення розгону струм $I_{\text{я}}$ двигуна зменшується до статичного струму I_{c} навантаження (що відповідає сталому режиму роботи двигуна):

$$I_{\text{c}} = M_{\text{c}} / c\Phi. \quad (2.40)$$

В сталому режимі вихідний сигнал Δ блоку НЕ стає рівним нулю. Подальша робота привода відбувається на горизонтальній частині статичних механічних характеристик тиристорного ЕП з розглянутою САК, що показані на рис.2.22.

Із аналізу розглянутої схеми САК та її функціонування відмітимо наступне:

1) САК з струмовою відсічкою характеризується технічною простотою та представляє собою одну з самих перших систем регулювання електроприводів;

2) однак даній САК властиві невисока якість регулювання швидкості й струму в динамічних режимах, тому останнім часом дана САК стала застосовуватися дуже рідко;

3) найбільше розповсюдження в останні (20-30) років отримали САК з підпорядкованим регулюванням, які відрізняються підвищеною якістю регулювання координат (струму, швидкості, положення) електропривода.

2.6.2 Тиристорний електропривод постійного струму з двоконтурною системою підпорядкованого однозонного регулювання швидкості

Спочатку нагадаємо сутність підпорядкованого регулювання, яка полягає у наступному:

1) всі автоматичні регулятори з'єднанні між собою послідовно;

2) кількість регуляторів дорівнює кількості давачів, а також дорівнює кількості контурів регулювання;

3) для будь-якого внутрішнього контуру завданням координати привода є вихідний сигнал зовнішнього (по відношенню до внутрішнього) регулятора;

4) максимальні (мінімальні) обмеження координат привода здійснюються за допомогою відповідно максимального (або мінімального) обмежень вихідних сигналів зовнішніх регуляторів.

На рис.2.23 представлена схема тиристорного ЕП постійного струму з однозонним регулюванням швидкості, в якій застосована двоконтурна підпорядкована система регулювання. Зазначена схема містить: автоматичний вимикач Q; тиристорні мости “Вперед” В і “Назад” Н реверсивного тиристорного перетворювача ТП; регулятори струму РС та швидкості РШ; давачі струму ДС та швидкості ДШ; блок обмеження БО; шунт Ш; логічний перемикаючий пристрій ЛПП (що здійснює вибір тиристорного моста, через який буде протікати якірний струм); системи імпульсно-фазового керування СІФК-В і СІФК-Н тиристорними мостами “Вперед” і “Назад” відповідно; задавач інтенсивності ЗІ. Зіркою (*) на схемі по показані задані значення швидкості ω^* та якірного струму $I_{\text{я}}^*$ (а без зірочки – фактичні значення цих величин).

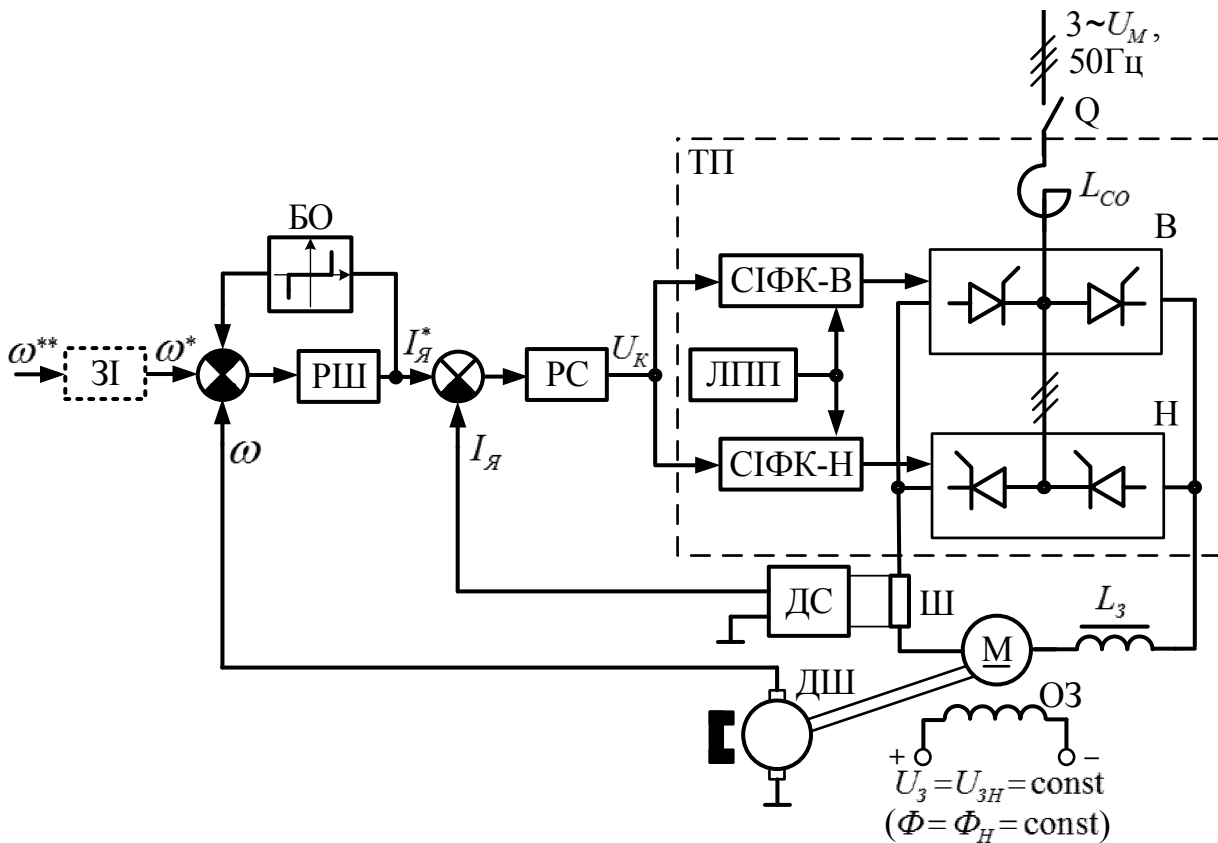


Рис.2.23 Схема тиристорного ЕП постійного струму з однозонним регулюванням швидкості, створена з використання двоконтурної підпорядкованої системи регулювання

В даній схемі у якості давача швидкості ДШ використано тахогенератор, який представляє собою малопотужну ЕМ постійного струму з магнітами, вигідна якірна напруга U_r якого прямо пропорційна швидкості ω згідно наступної формули:

$$U_r = E_r - R_r I_{яг} = c \Phi_r \omega - R_r I_{яг} \approx c \Phi_r \omega, \quad (2.41)$$

оскільки у тахогенератор характеризується малими значеннями активного опору R_r та якірного струму $I_{яг}$ (тобто $R_r I_{яг} \approx 0$), а магнітний потік Φ_r – постійний.

Задавач інтенсивності (ЗІ) – це пристрій, який формує сигнал завдання швидкості ω^* , що лінійно збільшується або зменшується до сталого значення швидкості ω^{**} , яке задається східчасто. Зазначене лінійне формування вихідного сигналу ω^* задавача інтенсивності забезпечує обмеження темпів (прискорення й уповільнення) та завдання тривалості часу розгону та гальмування двигуна.

Внутрішній контур регулювання в схемі САК на рис.2.23 слугує для регулювання якірного струму та містить регулятор струму РС й давач якірного струму ДС. Регулятор струму РС має настройку на модульний (технічний) оптимум. Завдання на якірний струм $I_{я}^*$ поступає з виходу регулятора

швидкості РШ. На вході регулятора струму РС порівнюються заданий $I_{Я}^*$ й фактичний $I_{Я}$ сигнали якірного струму.

Зовнішній контур регулювання призначено для регулювання швидкості та містить регулятор швидкості РШ та давач швидкості ДШ (у вигляді тахогенератора постійного струму, встановленого на валу якоря М двигуна). На вході регулятора швидкості порівнюються заданий ω^* та фактичний ω сигнали швидкості. Налаштування регулятора швидкості може бути виконана на модульний або симетричний оптимум.

Обидва регулятори (швидкості – зовнішній та струму – внутрішній) намагаються підтримати фактичні координати на рівні їх заданих значень: $\omega \approx \omega^*$ й $I_{Я} \approx I_{Я}^*$.

При цьому за допомогою блока обмеження БО обмежуються максимальна та мінімальна границі діапазону змінення сигналу завдання струму: $-I_{Я\max} \leq I_{Я}^* \leq +I_{Я\max}$ (де $I_{Я\max} \approx 2I_{ЯН}$), за рахунок чого забезпечується обмеження якірного струму у тих же припустимих межах: $-2I_{ЯН} < I_{Я} < 2I_{ЯН}$ (що вимагається, виходячи з умови стійкої комутації струму на колекторі двигуна). Слід зазначити, що струм додатної полярності ($I_{Я} \geq 0$) проводить тиристорний міст “В”, а від’ємної полярності ($I_{Я} < 0$) – тиристорний міст “Н”.

Вид статичних механічних характеристик для тиристорного ЕП постійного струму з підпорядкованою однозонною системою регулювання показаний на рис.2.24 для налаштувань регулятора швидкості РШ на технічний (а) і симетричний (б) оптимуми (при цьому регулятор струму налаштований на технічний оптимум). Згідно зазначеним СМХ розглядуваний тиристорний ЕП функціонує в чотирьох квадрантах механічної діаграми (І та ІІІ – двигуневий режим, ІІ та ІV – генераторний (гальмівний) режим з рекуперацією енергії від двигуна через ТП в електричну мережу). При цьому значення максимального ($+M_{\max}$) і мінімального ($-M_{\max}$) електромагнітного моменту двигуна прямо пропорційні відповідно максимальному і мінімальному значенню якірного струму: $+M_{\max} = c\Phi_H I_{Я\max}$ та $-M_{\max} = c\Phi_H (-I_{Я\max})$.

З аналізу отриманих СМХ на рис. 2.24 та режимів функціонування тиристорного ПЗ двоконтурною системою підпорядкованого регулювання випливає:

1) статичні механічні характеристики тиристорного електропривода постійного струму з підпорядкованим регулюванням при однозонному регулюванні представляють собою: сімейство похилих паралельних прямих (при настройці РШ на модульний оптимум) і сімейство горизонтальних паралельних прямих (при настройці РШ на симетричний оптимум);

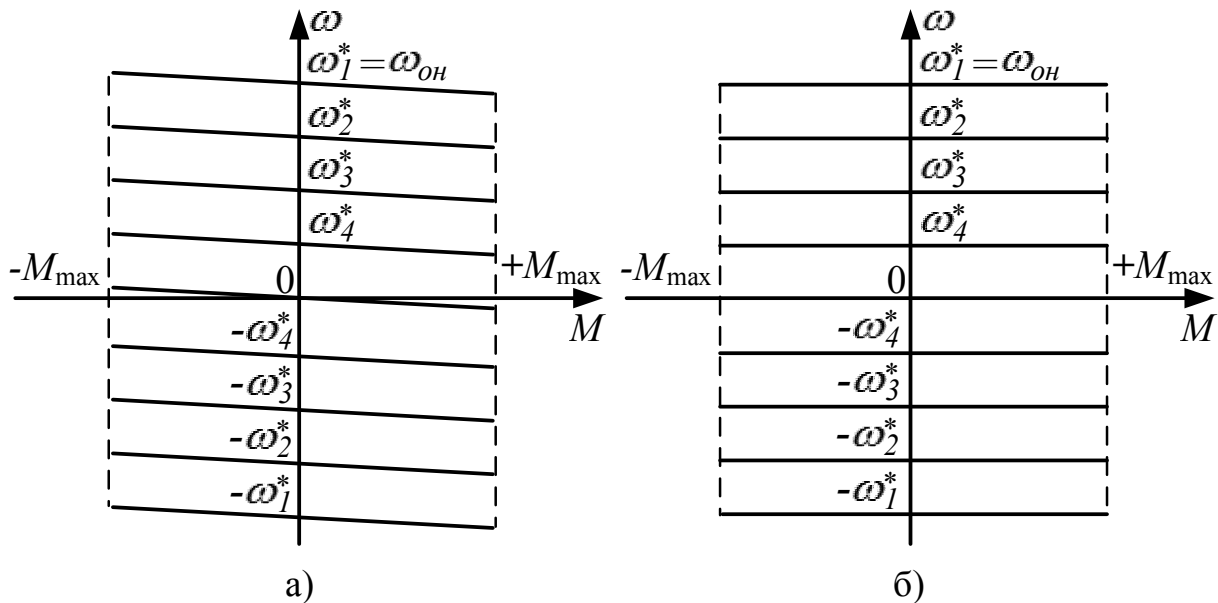


Рис.2.24 Статичні механічні характеристики тиристорного ЕП постійного струму з двоконтурною системою підпорядкованого однозоного регулювання (при настройці РШ: а – на модульний оптимум; б – на симетричний оптимум)

2) при настроюванні контуру швидкості на модульний оптимум (МО) відхилення $\Delta\omega$ швидкості від її заданого значення $\Delta\omega^{MO} = \omega^* - \omega^{MO}$ складає в сталому режимі:

$$\Delta\omega^{MO} = \frac{4T_{\mu}}{J} M, \quad (2.42)$$

де T_{μ} – мала постійна часу струмового контуру, яка складає для трьохфазної мостової схеми (4-8)мс, а для трьохфазної нульової – (8-16)мс;

J – приведений до валу двигуна момент інерції привода;

3) з врахуванням здійснюваного регулювання відбувається одночасне з цим обмеження максимального та мінімального створюваного електромагнітного моменту двигуна:

$$-M_{\max} \leq M \leq +M_{\max}, \quad (2.43)$$

які звичайно здійснюється на рівні двократного від номінального значення моменту двигуна: $|\pm M_{\max}| = 2M_H$;

4) представлені СМХ тиристорного ЕП дещо відрізняються від СМХ самої електричної машини, що обумовлено впливом автоматичних регуляторів (в основному – швидкості);

5) тиристорний ЕП вигідно відрізняється від ЕП постійного струму з системою “Г-Д”, оскільки: має підвищену швидкодію, зменшені масу, габарити та вартість (оскільки містить тільки одну електричну машину), а також має більш високий ККД (оскільки ККД тиристорного перетворювача високе 0,92-0,98, і є вищим ККД електричної машини). Тому практично всюди к теперішньому часу електроприводи системи “Г-Д” замінені на електроприводи

з тиристорним перетворювачем, що відповідає задачам енергозбереження та підвищення експлуатаційної надійності;

б) основні показники якості регулювання тиристорних ЕП постійного струму:

а) час відпрацювання моменту – не більше 20 мс;

б) діапазон регулювання швидкості вниз від номінальної:

– 1:100 – з тахогенератором;

– 1:(1000-10000) й нижче – при застосуванні імпульсного давача швидкості;

в) точність підтримання швидкості з похибкою менше $\pm 1\%$ (від номінальної швидкості) – при ДШ на основі тахогенератора та $\pm (0,01-0,001)\%$ й менше – для цифрових давачів швидкості.

2.6.3 Тиристорний електропривод з зовнішнім контуром регулювання ЕРС двигуна

У тих випадках, коли не має потреби точного регулювання швидкості (дозволена похибка за точністю регулювання швидкістю до $\pm 5\%$ від номінального значення швидкості двигуна) та не потрібен глибокий діапазон регулювання швидкості (достатньо не нижче 1:20 вниз від номінальної швидкості двигуна), застосовуються двоконтурні САК з зовнішнім контуром регулювання ЕРС двигуна. Схема тиристорного ЕП з двоконтурною системою підпорядкованого однозонного регулювання і зовнішнім контуром регулювання ЕРС двигуна наведена на рис.2.25. В цій схемі (на відміну від схеми з однозонним регулюванням швидкості на рис.2.24) в зовнішньому контурі регулювання використовуються регулятор ЕРС (РЕ) та давач ЕРС (ДЕ). Для цього регулятора сигнал E зворотного зв'язку по ЕРС двигуна обчислюється давачем ЕРС (ДЕ) із співвідношення:

$$E \approx U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (2.44)$$

через інформацію о напрузі якоря $U_{\text{я}}$ та струму якоря $I_{\text{я}}$ двигуна, що отримується від давачів напруги ДН й струму ДС відповідно. При цьому згідно (2.1) при постійному (номінальному) значенні магнітного потоку Φ_H двигуна значення електрорушійної сили прямо пропорційне швидкості ω двигуна $E \sim \omega$.

Областю застосування двоконтурної САК з зовнішнім контуром регулювання ЕРС є – приводи, де не вимагається висока точність підтримання швидкості (припустима похибка $\pm 5\%$) та не високий діапазон регулювання швидкості (не нижче 1:20 від номінальної швидкості). Невисока точність підтримки швидкості викликана похибкою вимірювання ЕРС двигуна (оскільки значення $R_{\text{я}}$ не залишається незмінним, а варіюється від температури двигуна).

СМХ електропривода з розглядуваною САК будуть такими ж, як і для тиристорного ЕП постійного струму з двоконтурною системою підпорядкованого однозонного регулювання швидкості (при настройці контуру швидкості на модульний оптимум).

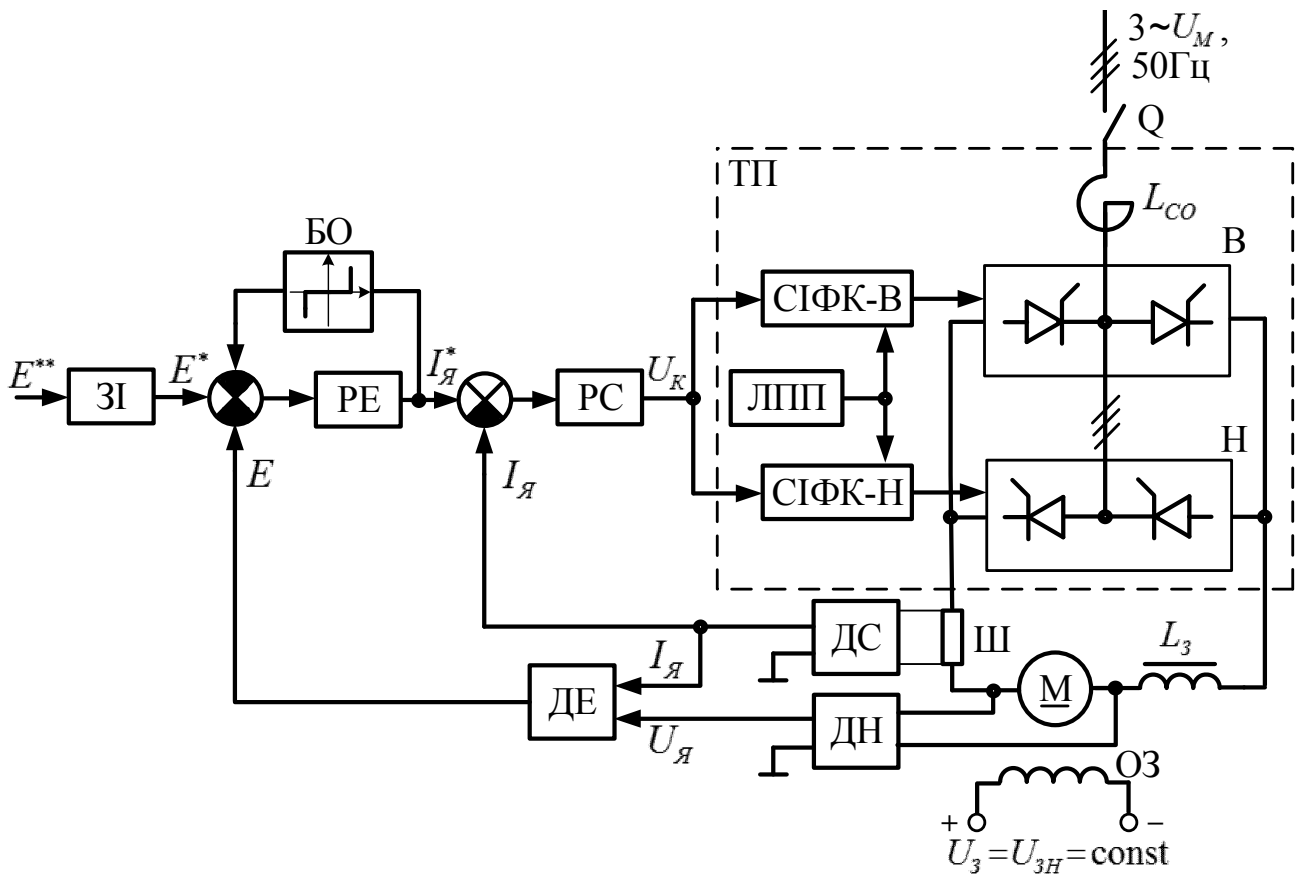


Рис.2.25 Схема двоконтурної САК тиристорного ЕП постійного струму з зовнішнім контуром регулювання ЕРС

Перевагами розглядуваної схеми являються: простота й дешевизна, збільшена експлуатаційна надійність (що обумовлені відсутністю давача швидкості, який більш дорожчий та технічно складніший, менш надійний, ніж давачі напруги, струму й ЕРС, які не потребують для свого встановлення другого кінця валу двигуна).

2.6.4 Тиристорний електропривод з системою підпорядкованого двозонного регулювання швидкості

Двобіжне регулювання швидкості тиристорного ЕП постійного струму застосовується в тому випадку, коли необхідно регулювати швидкість двигуна не тільки вниз, але й вгору – від номінальної швидкості. При цьому вниз ($\omega \leq \omega_H$) швидкість ДПС регулюється збільшенням якірної напруги, а вгору від номінальної ($\omega > \omega_H$) – ослабленням магнітного потоку ($\Phi < \Phi_H$) двигуна. Назва схеми обумовлена здійсненням в ній двох зон (швидкісних діапазонів) керування:

- 1) І зона ($|\omega| \leq \omega_H$) – при незмінному потоці, що дорівнює своєму номінальному значенню: $\Phi = \Phi_H = \text{const.}$

Схема на рис.2.26 містить два канали керування:

- 1) з впливом на якірну напругу двигуна;
- 2) з впливом на напругу обмотки збудження.

Тиристорний збудник ТЗ представляє собою малопотужний нереверсивний керований випрямляч (КВ), що живить обмотку збудження ОЗ, потужність якої складає приблизно (3-5)% від номінальної потужності двигуна постійного струму.

Розглянемо роботу САК в I-й та II-й зонах. На рис.2.27 приведені часові діаграми швидкості ω , електрорушійної сили E та магнітного потоку Φ двигуна, які ілюструють розгін двигуна до заданої швидкості ω^* , а на рис.2.28 – СМХ для тиристорного електропривода з двозонним керуванням при настройці регулятора швидкості на модульний (МО) і симетричний оптимум (СО).

В другій зоні, виходячи з здійснюваного незмінного струмообмеження: $|I_A| \leq I_{A \max} \approx 2I_{AH}$, максимальний момент знижується згідно залежності: $M_{\max} = c\Phi I_{A \max}$ через зменшення потоку Φ (зворотно пропорційного швидкості ω).

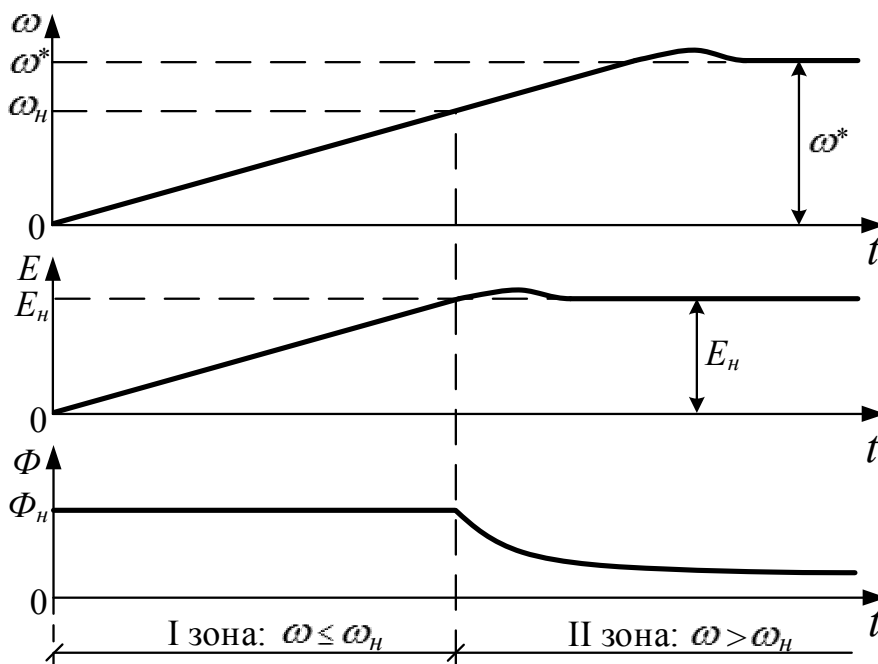


Рис.2.27 Часові діаграми швидкості ω , електрорушійної сили E та магнітного потоку Φ двигуна при розгоні двигуна до заданої швидкості ω^* для двозонного регулювання

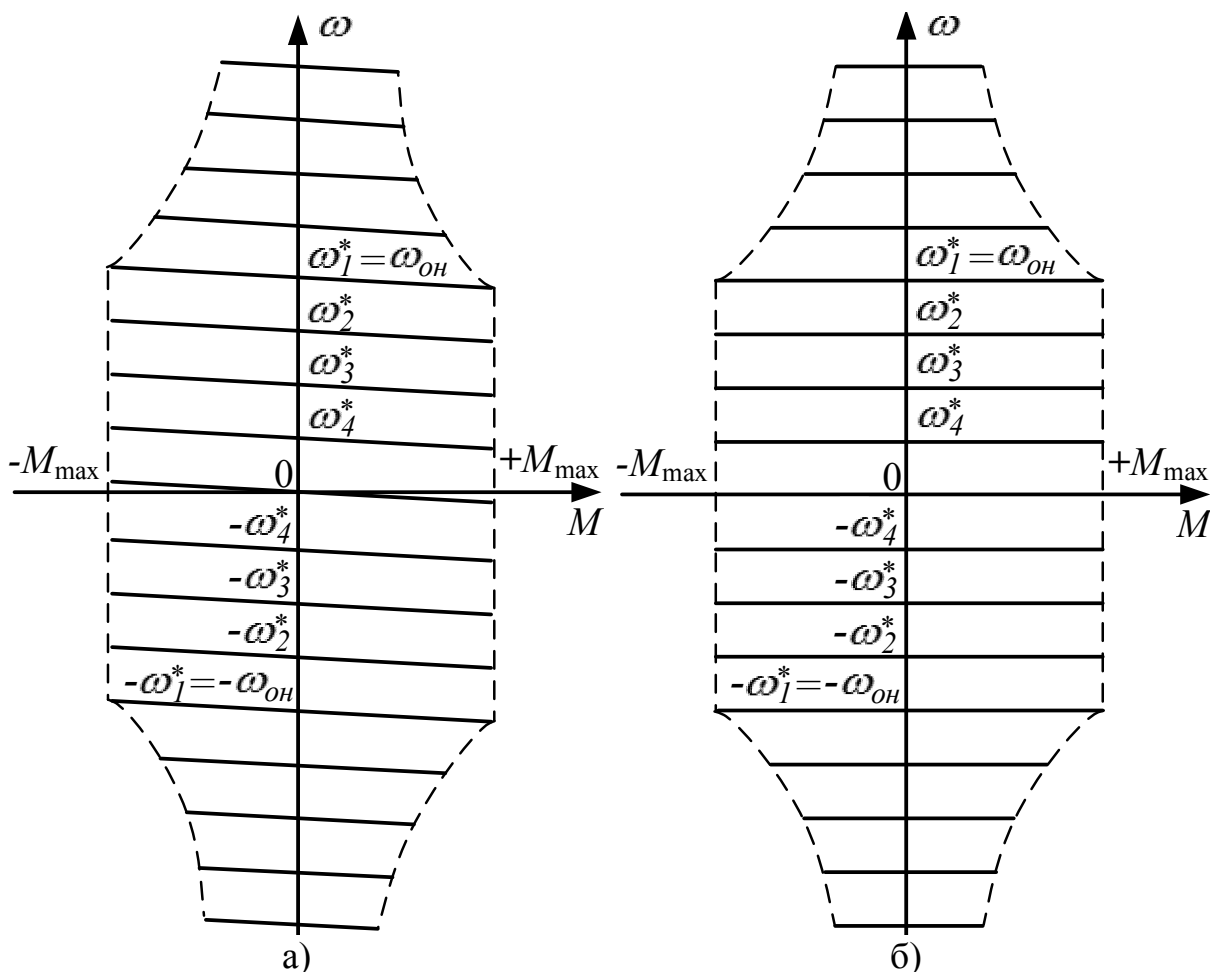


Рис.2.28 СМХ для тиристорного електропривода постійного струму з двозонним керуванням при настройці контуру швидкості: а – на МО; б – на ГО.

Областю застосування двозонного керування є електроприводи, в яких необхідно регулювати швидкість двигуна вище номінального значення.

2.6.5 Тиристорні електроприводи постійного струму з регулюванням положення

Частіше за все на практиці потрібно переміщати виконуючий орган робочої машини з одного нерухомого стану до іншого нерухомого стану, що знаходиться на деякій відстані від початкового стану (наприклад: вагонетка, каретка мостового крану, засувка насосної станції, стіл поздовжньо-стругального станка, ліфт та інше). Переміщення з одного фіксованого стану до іншого фіксованого (нерухомого) стану називається позиціонуванням.

На практиці знайшли застосування два способи здійснення позиціонування в електроприводі:

- 1) з використанням двоконтурної системи однозонного підпорядкованого регулювання швидкості (або ЕРС) й кінцевих (шляхових) вимикачів;
- 2) з застосуванням трьохконтурної системи однозонного підпорядкованого регулювання положення.

Розглянемо перший спосіб – позиціонування за допомогою двоконтурної системи однозонного підпорядкованого регулювання швидкості (або ЕРС) та

кінцевих вимикачів, який ілюструється функціональною схемою електропривода на рис.2.29 та швидкісними діаграмами до неї, що наведені на рис.2.30.

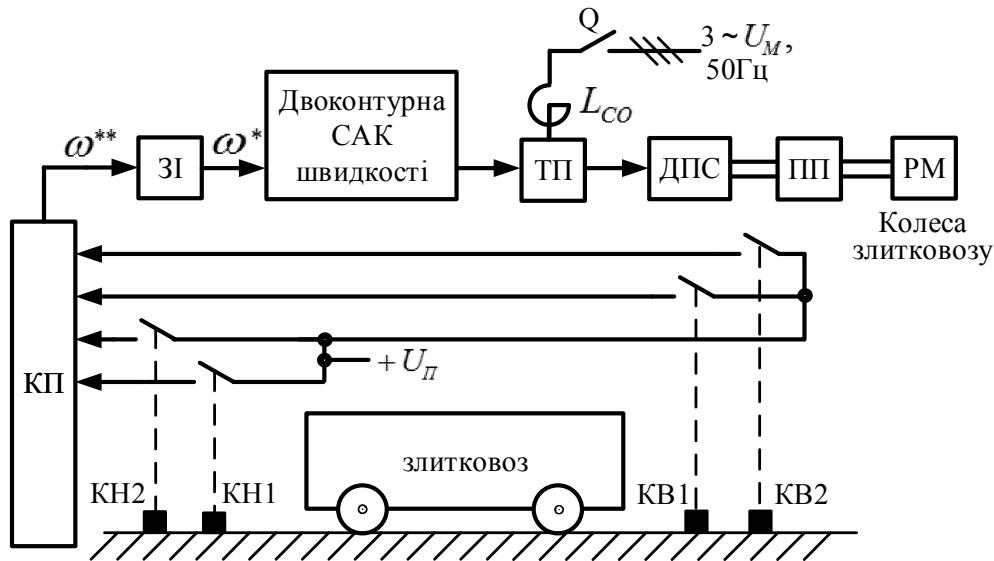


Рис.2.29 Функціональна схема позиційного тиристорного ЕП постійного струму (для способу 1).

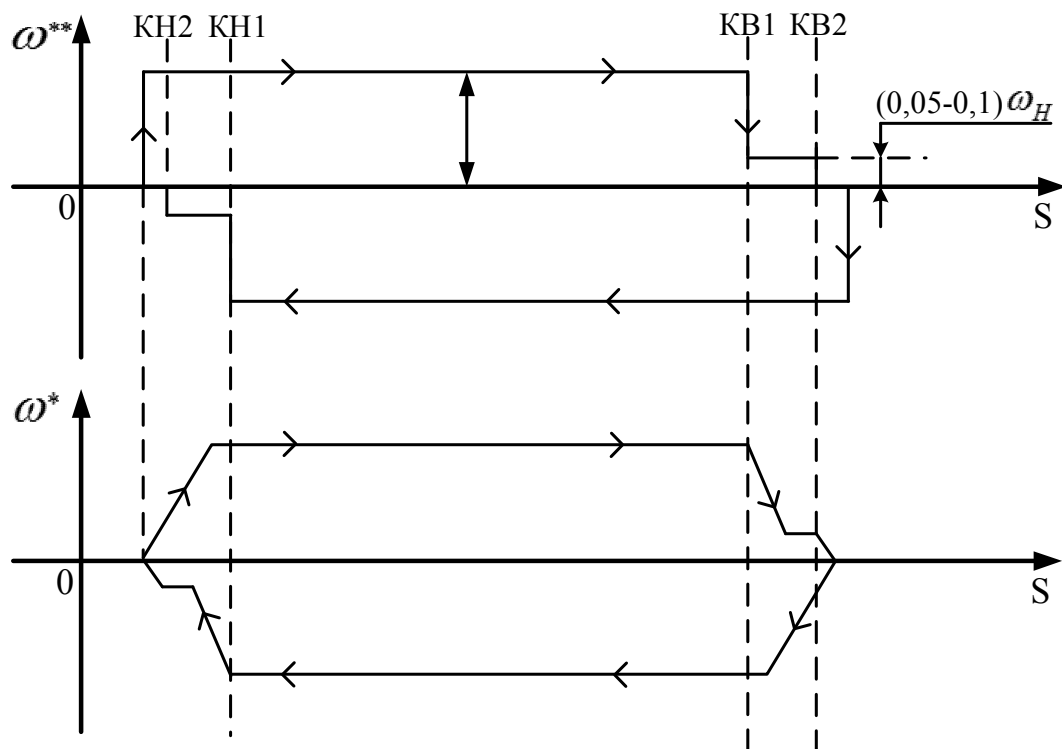


Рис.2.30 Швидкісні діаграми позиційного ЕП (при 1-му способі).

На функціональній схемі на рис.2.29 прийняті такі умовні позначення: 3I – задавач інтенсивності; ТП – тиристорний перетворювач постійного струму; ДПС – двигун постійного струму; ПП – передавальний пристрій; РМ – робоча

машина; КП – командний пристрій (який виконує функцію задавача швидкості ω^* в залежності від шляху S); KB1, KB2 – кінцеві (шляхові) вимикачі “Вперед”; КН1, КН2 – кінцеві (шляхові) вимикачі “Назад”.

Розглянемо позиціонування злитковозу (в якому тиристорний ЕП постійного струму приводить у рух тяговий привод коліс).

Кінцеві вимикачі KB1, KB2 та КН1, КН2 забезпечують правильний (в потрібному місці) останов злитковозу. При цьому існують два типи кінцевих (шляхових) вимикачів:

- 1) контактні:
 - важільні (типу тумблерів з пружинами);
 - натискні (включаються при натисканні на шток, а вертаються під дією пружини)
- 2) безконтактні – індукційні давачі положення.

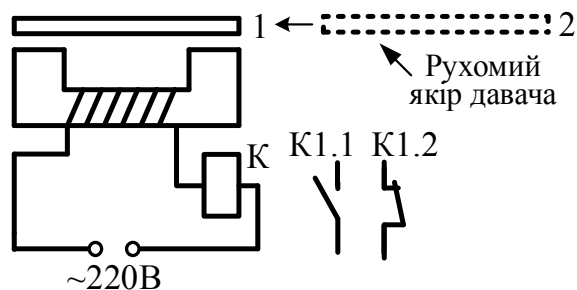


Рис.2.31 Схема функціонування безконтактного давача положення

Схема функціонування безконтактного давача положення наведена на рис.2.31. В цій схемі якор давача пов'язаний з виконуючим органом РМ. Коли якор знаходиться навпроти в положенні 2, магнітопровід осердя розімкнений, електричний опір котушки (що намотана на осердя магнітопроводу) малий й через котушку реле К протікає струм, який забезпечує увімкнення контактів цього реле (контакт К1.1 замкнеться, а К1.2 – розімкнеться).

Коли рухомий якор (жорстко механічно зв'язаний з корпусом злитковозу) замкне магнітопровід осердя (положення 1) електричний опір котушки (що намотана на осердя магнітопроводу) значно збільшиться, а струм в котушці при цьому зменшиться й реле К відключиться (його контакти К1.1 та К1.2 повернуться до попередніх станів, що показані на рис.2.31).

Позиційний ЕП на рис.2.29. функціонує наступним чином. При русі “Вперед” (вправо) швидкість ω дорівнює номінальній ω_H . При замиканні контакту KB1 задається перехід на зменшену швидкість, що дорівнює $(0,05-0,1)\omega_H$. При замиканні KB2 задається швидкість, яка дорівнює нулю, відбувається останов злитковозу зі зменшеної швидкості (з положення, де розташований давач KB2). За рахунок зменшеної швидкості збільшується точність позиціонування при останові (при впливі інерції, тертя та зміни навантаження злитковозу). При русі “Назад” (вліво) злитковіз працює

аналогічно, однак замість датчиків KB1 та KB2 вступають в роботу датчики КН1 та КН2.

Перевагами розглянутого способу позиціонування є технічна простота, а недоліком – те, що не досягається гранична швидкодія при відпрацювання нового положення (через наявність ділянки роботи зі зменшеною швидкістю). Область застосування даного способу позиціонування розповсюджується на ті механізми, де не має потреби високої швидкодії при позиціонуванні.

Розглянемо функціонування трьохконтурної системи однозонного підпорядкованого регулювання положення для тиристорного ЕП постійного струму (за другим способом).

В трьохконтурній системі підпорядкованого регулювання положення тиристорного ЕП постійного струму, функціональна схема якої наведена на рис.2.32, додатково добавляється (у порівнянні з двоконтурною системою підпорядкованого регулювання швидкості) третій зовнішній контур регулювання положення: з регулятором положення РП й датчиком положення ДП (який з'єднаний з валом двигуна через редуктор i). Блок обмеження БО2 слугує для обмеження на рівні номінального значення $+\omega_H$ та $-\omega_H$ максимальної (з напрямком обертання “Вперед”) і мінімальної (з напрямком обертання “Назад”) швидкості двигуна.

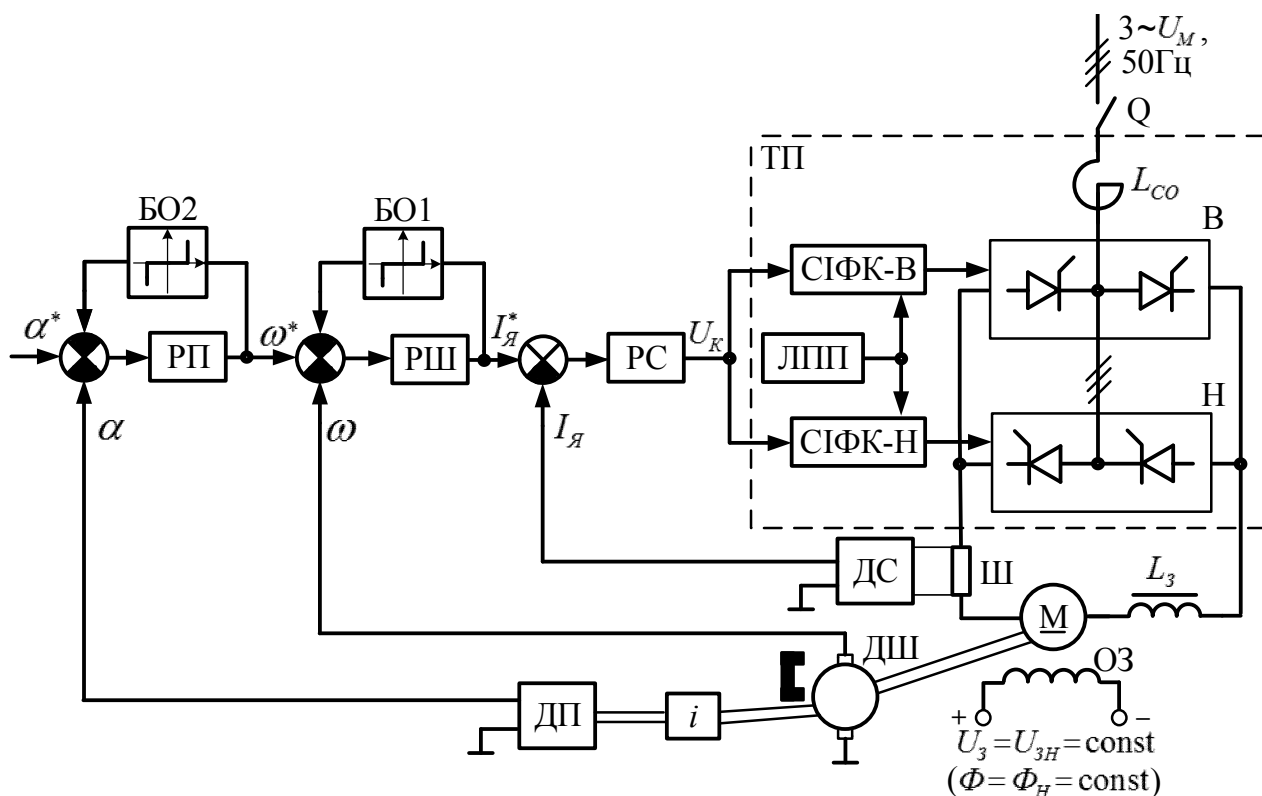


Рис.2.32 Функціональна схема тиристорного ЕП постійного струму з трьох контурною системою однозонного підпорядкованого регулювання (для способу 2)

В даній системі позиціонування застосовуються основні види давачів положення:

- потенціометричні (які є ненадійними, оскільки мають ковзний рухомий контакт);
- сельсинні (сельсин представляє собою малопотужну ЕМ змінного струму, а давачі на положення на їх основі знайшли найбільш широке застосування на практиці завдяки високій точності (0,5-1)% та надійності);
- імпульсні індуктивні (містять індуктивний давач та шестерню з сталі на валу двигуна, мають високу точність (0,1-0,01)%);
- імпульсні фотоелектричні (містять світловипромінювач, фотоприймач та зубчасту шестерню з світлонепровідного матеріалу, мають низьку надійність при роботі в запилених середовищах та високу точність регулювання (0,1-0,01)%).

На рис.2.33 наведені часові діаграми швидкості ω , положення α валу ротора, електромагнітного моменту M та якірного струму $I_{Я}$ двигуна при відпрацюванні заданого положення α^* в позиційному тиристорному ЕП з трьохконтурною системою однозонного підпорядкованого регулювання.

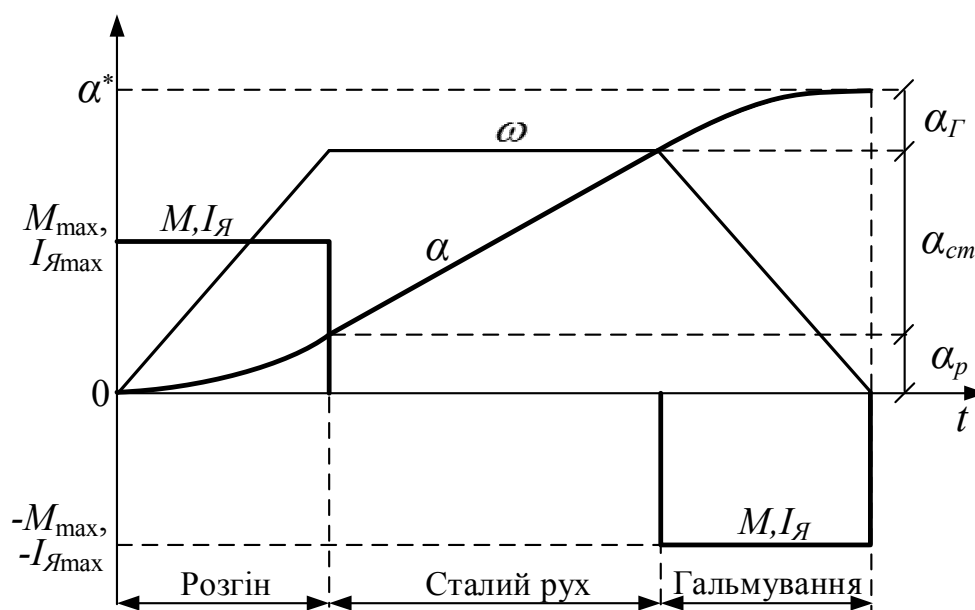


Рис.2.33 Часові діаграми робочих координат тиристорного ЕП при позиціонуванні (для способу 2)

Достоїнствами розглядуваного способу позиціонування є – гранична (максимально можлива) швидкодія при відпрацюванні нового положення, що обумовлено:

- 1) максимальними значеннями моменту (M_{\max}) та якірного струму ($I_{Я \max}$ двигуна);
- 2) відсутністю в діаграмі режимів “дотягування” на низькій швидкості й перерегулювання, що досягається за допомогою параболічного регулятора положення.

Недоліком даного способу керування є – складність та дороговизна, які пов'язані з застосуванням і встановленням на валу двигуна сельсина.

Область застосування тиристорного ЕП з трьохконтурною системою підпорядкованого регулювання положення розповсюджується на швидкодіючі позиційні та слідкуючі електроприводи.

Контрольні питання

1. Функціональна схема тиристорного електропривода постійного струму зі струмовою „відсічкою” (назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).

2. Штучні СМХ двигуна постійного струму незалежного збудження в тиристорному електроприводі постійного струму зі струмовою „відсічкою” (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

3. Сутність підпорядкованого регулювання параметрів в електроприводі.

4. Функціональна схема тиристорного електропривода постійного струму з однозонним регулюванням швидкості, створена з використанням двоконтурної підпорядкованої системи регулювання.

5. Штучні СМХ двигуна постійного струму незалежного збудження з двоконтурною системою підпорядкованого однозонного регулювання (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

6. Основні показники якості регулювання тиристорних електроприводів з підпорядкованим регулюванням (час відпрацювання електромагнітного моменту, діапазон регулювання швидкості, точність підтримання швидкості).

7. Функціональна схема тиристорного електропривода постійного струму із зовнішнім контуром регулювання ЕРС двигуна (назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).

8. Штучні СМХ двигуна постійного струму незалежного збудження в тиристорному електроприводі із зовнішнім контуром регулювання ЕРС двигуна (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

9. Функціональна схема тиристорного електропривода постійного струму з системою підпорядкованого двозонного регулювання швидкості (назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).

10. Штучні СМХ двигуна постійного струму незалежного збудження в тиристорному електроприводі з системою підпорядкованого двозонного регулювання швидкості (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

11. Основні способи здійснення позиціонування в електроприводі. Сутність способу позиціонування з використанням двоконтурної системи однозонного підпорядкованого регулювання швидкості (або ЕРС) й кінцевих (шляхових) вимикачів.

12. Функціональна схема тиристорного електропривода постійного струму з трьохконтурною системою підпорядкованого регулювання положення (назва та призначення елементів схеми, принцип роботи).

13. Часові діаграми зміни робочих координат тиристорного електропривода постійного струму з трьохконтурною системою підпорядкованого регулювання положення (аналітичний та графічний вид СМХ, діапазон регулювання швидкості, переваги та недоліки, область застосування).

2.7 Релейно-контакторне керування електроприводами постійного струму

2.7.1 Загальні поняття

Релейно-контакторним керуванням ЕП називається такий спосіб керування, який здійснюється за допомогою релейно-контакторної апаратури (контакторів та реле).

Контактори і реле – це електромагнітні пристрої, які містять: електричну обмотку (котушку), що встановлена на сталюму осерді; рухому частину (виготовлену зі сталі), яка називається якорем; групи нормально відкритих (н.в.) і нормально замкнутих (н.з.) контактів. Причому, в кожній групі контактів, що замикаються або розмикаються, один з контактів залишається нерухомим, а інший жорстко зв'язаний з якорем і переміщується разом зі зміною положення якоря.

Спрощена схема конструкції і принцип дії контакторів і реле (які схожі між собою) та їх умовні позначення наведені на рис.2.34.

Розглянемо принцип дії контактора і реле. При подачі на котушку контактора (реле) напруги U_k , що перевищує напругу включення (спрацювання) $U_{вкл}$, в осерді якоря (під дією струму, що протікає у котушці) створюється магнітний потік, який викликає під дією електромагнітної сили притягнення сталюого якоря (в нижнє положення на рис.2.34,а) до осердя. При цьому: пружини контактора (реле) стискаються, нормально відкритий контакт замикається, а нормально замкнутий – розмикається.

При знятті напруги U_k з котушки контактора (реле) або зменшенні його значення менше напруги відпускання $U_{відн.}$ магнітний потік в котушці зменшується, електромагнітні сили котушки слабшають і якір під дією пружин повертається до вихідного (верхнього) положення. При цьому повертаються у початкові стани контакти контактора (реле), а саме: нормально відкриті контакти розмикаються, а нормально замкнуті контакти – замикаються.

При цьому реле містить декілька слабкострумових н.о. та н.з. контактів, розрахованих звичайно на комутацію струмів значеннями не більше (2-5)А. На відміну від реле, контактори містять одночасно, як декілька слабкострумових контактів (розрахованих на струм 2-5А), так і силові (сильно струмові)

контакти, які забезпечують комутацію великих значень струмів (від 10 до 1000А – в залежності від обраного типу контактора).

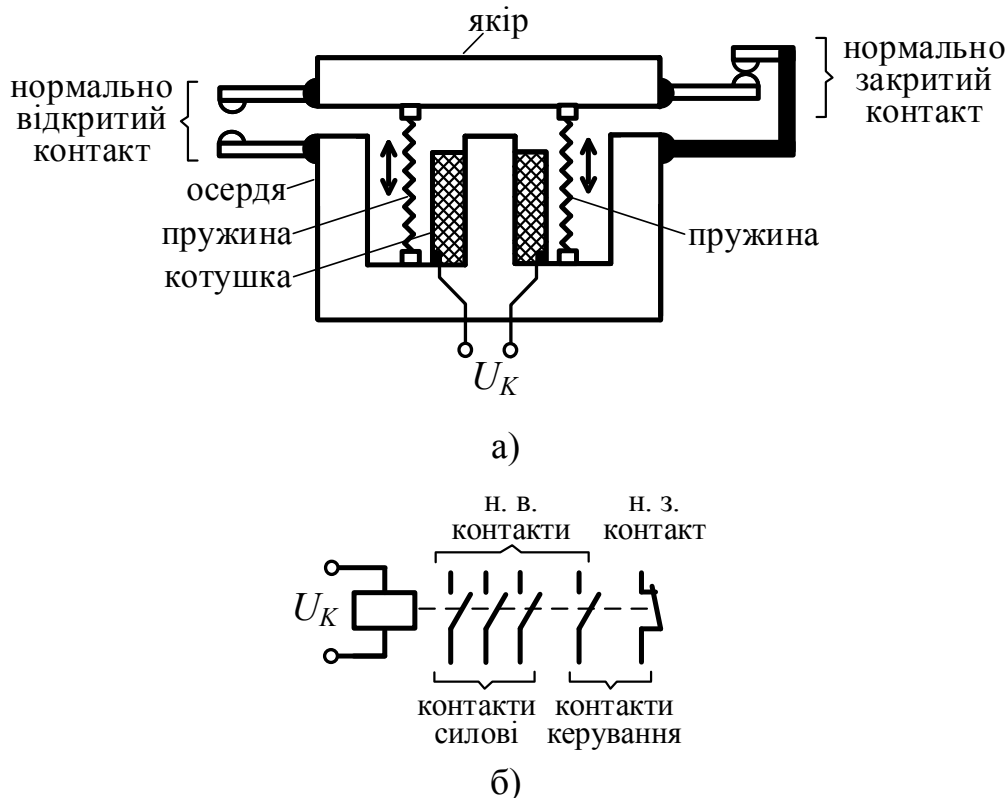


Рис.2.34 Спрощена схема конструкції (а) і умовні позначення (б) котушки (контактора або реле) та контактів

На електричних схемах котушки контакторів звичайно позначаються заголовною буквою К, а реле – заголовною буквою Р. Після цих букв вказується додаткове літерне і цифрове позначення, що дає інформацію про призначення або номері контактора (реле) на конкретній схемі.

До основних електричних параметрів контакторів і реле відносяться:

- рід напруги (струму): постійна або змінна;
- номінальний струм (найбільш припустиме значення тривало протікаючого струму через контакти);
- номінальні робочі напруги для котушки і контактів;
- число полюсів (один, два або три) для силових контактів контакторів;
- параметри котушки
 - напруга і струм включення (спрацювання);
 - напруга і струм відпускання (відключення);
- час:
 - включення (спрацювання);
 - відпускання (відключення);
- максимально припустима кількість включень на годину (звичайно від 500 до 3000 разів).

Переходячи до подальшого розгляду релейно-контакторних електричних схем звернемо увагу на те, що в цих схемах *умовилися показувати стани контактів реле і контакторів, що відповідають знеструмленому стану їх котушок.*

Реле часу відрізняються від звичайних реле тільки тим, що при знятті напруги з їх котушок н.о. та н.з. контакти повертаються до вихідного стану (що відповідає знеструмленій котушці) з витримкою часу τ значення якої для реле часу можна регулювати. Умове позначення реле часу показане на рис. 2.35.

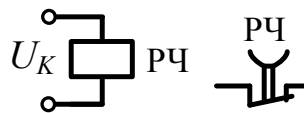


Рис.2.35 Умове позначення реле часу (з витримкою часу при відключенні котушки)

Важливими складовими елементами релейно-контакторних схем є кнопки керування, спрощені конструкції і умовні позначення яких показані на рис.2.36. Кнопка “Пуск” представляє собою кнопку чорного (зеленого або синього) кольору з підпружиненим нормально-відкритим контактом (яка наведена на рис.2.36,а), а кнопка “Стоп” – кнопку червоного кольору з підпружиненим нормально-замкнутим контактом (яка наведена на рис.2.36,а).

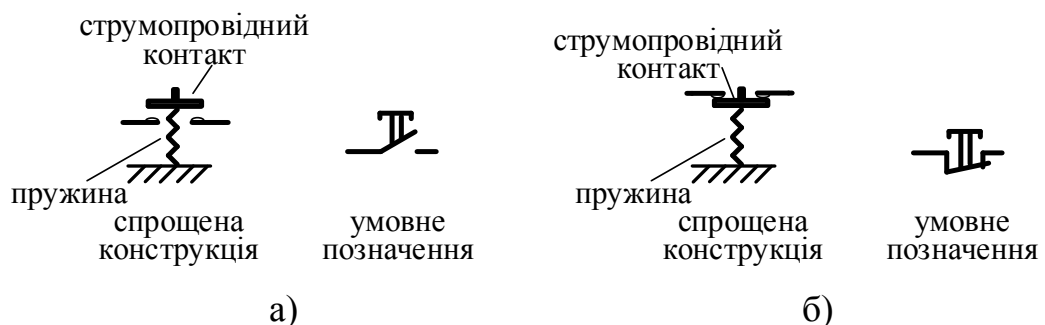


Рис.2.36 Спрощена конструкція та умовні позначення кнопок керування: а – кнопки “Пуск”; б – кнопки “Стоп”

В теперішній час область застосування релейно-контакторного керування розповсюджується на ті електроприводи постійного і змінного струму, які основну частину з загального часу роботи функціонують в сталих режимах на природній статичній механічній характеристиці двигуна (тобто при швидкостях двигуна, близьких до номінальної). Саме ж релейно-контакторне керування в зазначених електроприводах застосовується для здійснення їх пуску, реверсу (змінення напрямку обертання) або гальмування двигуна.

В умовах здороження електроенергії за кордоном і в Україні відрізняється перехід на регульований електропривод з напівпровідниковими перетворювачами. Зокрема, для ДПС – ЕП з тиристорним перетворювачем, для АД – на ЕП зі статичним перетворювачем частоти (СПЧ).

У зв'язку з цим все рідше на практиці застосовуються РКК, яке характеризується підключенням в ланцюг двигуна (для ДПС – до якоря, для АД з фазним ротором – до ротору, для АД з короткозамкненим ротором – до статора) за допомогою контакторів додаткових активних опорів (резисторів). Це обумовлено тим, що в зазначених резисторах виділяються додаткові втрати електроенергії.

У зв'язку з цим в сучасних умовах релейно-контакторне керування застосовується обмежено й лиш тільки там, де додаткові втрати електроенергії, які виникають при цьому, невеликі:

1) для розгону (пуску) двигуна постійного або змінного струму, коли ці пуски дуже рідкі, а основний час електропривод працює з незмінною швидкістю, що дорівнює номінальній;

2) для гальмування (до повної зупинки) або зміни напрямку обертання (реверсу) двигуна постійного або змінного струму, коли дані режими гальмування й реверсу відносно рідкі, а основний час електропривод працює з номінальною швидкістю (“Вперед” або “Назад”) або знаходиться в зупиненому стані. Наприклад, крани, ліфти та інше, хоча останнім часом в них теж відбувається перехід до ЕП з напівпровідниковими перетворювачами з метою економії електроенергії.

При РКК існують наступні види гальмування:

- гальмування на вибігу ($I_{\text{я}} = 0$, $M = 0$);
- динамічне гальмування;
- гальмування противімкненням.

2.7.2 Спосіб пуску ДПС незалежного збудження шляхом перемикавання ступенів додаткового резистора в ланцюзі обмотки якоря

Проаналізуємо можливість режиму прямого пуску ДПС незалежного збудження від мережної постійної напруги U_M , що дорівнює номінальному значенню якірної напруги ($U_M = U_{\text{яН}}$). З врахуванням рівності нулю швидкості ω якоря двигуна у первісний момент пуску ($\omega = 0$) згідно другого рівняння з (2.1) значення електрорушійної сили у зазначений момент часу також дорівнює нулю: $E = 0$, еквівалентна схема заміщення двигуна для даного часу перетворюється (від наведеної на рис.2.1) до вигляду, представленого на рис.2.37,а.

Виходячи з схеми заміщення на рис.2.37,а розрахуємо пусковий якірний струм двигуна:

$$I_{\text{япуск}} = \frac{U_{\text{яН}}}{R_{\text{я}}} = (15 - 20)I_{\text{яН}}, \quad (2.45)$$

який при номінальній якірній напрузі складе (з врахуванням малого значення активного опору $R_{\text{я}}$ якірної обмотки) в цьому випадку (15-20) – кратне значення від номінального якірного струму $I_{\text{яН}}$ двигуна.

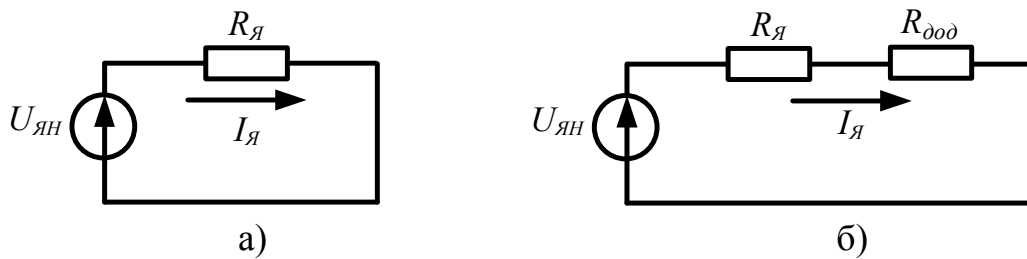


Рис.2.37 Еквівалентні схеми заміщення ДПС для прямого пуску від номінальної якірної напруги (а – без додаткового резистору; б – з додатковим резистором в ланцюгу обмотки якоря)

В той же час відомо, що виходячи з умови (1.26) нормальної комутації струму на колекторі ДПС, його струм не повинен перевищувати максимально припустимого значення, що дорівнює (2,5-3)-кратному значенню від номінального якірного струму $I_{яН}$ двигуна. Якщо не виконати зазначеного обмеження струму, то починається іскріння на колекторі, що переходить до колового вогню і приводить до несправності колектора і двигуна.

Для обмеження пускового якірного струму двигуна на рівні максимально припустимого значення при пуску необхідно в якірну обмотку двигуна включити додатковий резистор зі значенням електричного опору, що визначається з формули:

$$R_{доd} \geq \frac{U_{яН}}{I_{я\max}} - R_{я} . \quad (2.46)$$

Даному режиму роботи відповідає еквівалентна схема заміщення ДПС, яка наведена на рис.2.37,б.

При подальшому збільшенні швидкості двигуна при розгоні у відповідності зі штучною СМХ, що властива ДПС незалежного збудження при номінальних параметрах ($U_{я} = U_{яН}$, $\Phi = \Phi_H$) та введенні додаткового резистора (наприклад, резистора $R_{доd4}$ на рис.2.9,а) в ланцюг якоря, відбувається зі збільшенням швидкості ω одночасне зменшення електромагнітного моменту M двигуна: від значення $M_{\max} = c\Phi_H I_{я\max}$ при $\omega = 0$ до значення $M = 0$ при $\omega = \omega_{oH}$. При цьому з зазначеного зменшення електромагнітного моменту двигуна не тільки погіршується динаміка розгону електропривода (зокрема суттєво збільшується його час розгону), але навіть може не відбутися необхідний розгін двигуна до його природної механічної характеристики (наприклад, якщо електромагнітний момент M при розгоні зрівняється або стане менше статичного моменту M_c електропривода).

Для покращення динаміки розгону і підвищення значення електромагнітного моменту M двигуна при розгоні на практиці широко застосовується спосіб пуску, в якому при пуску змінюється ступінчасто значення електричного опору додаткового резистора, що вводиться в ланцюг якоря двигуна. Сутність даного способу ілюструється схемою на рис.2.38, а, в якій:

– в початку пуску (при нульовій швидкості двигуна) контакти контакторів КП1 і КП2 залишаються розімкненими, замикаються контакти КЛ, подається напруга на якірну обмотку, в ланцюг якої включений додатковий резистор з електричним опором $R_{\text{доd1}} = R_{\text{d1}} + R_{\text{d2}}$, відбувається режим розгону двигуна по ділянці 1 на рис.2.38,б від нульової швидкості до значення швидкості ω_1 ;

– коли двигун розігнався до значення швидкості ω_1 , замикається контакт КП1, значення додаткового резистора в ланцюгу якоря зменшується до значення $R_{\text{доd2}} = R_{\text{d2}}$, розгін продовжується з підвищеним значенням електромагнітного моменту M по ділянці 2 прямої на рис.2.38,б, від значення швидкості ω_1 до значення ω_2 ;

– коли двигун розігнався до значення швидкості ω_2 , замикається контакт КП2, повністю шунтується контактами КП1 і КП2 додатковий резистор (тобто його значення опору $R_{\text{доd3}} = 0$), подальший розгін відбувається на природній механічній характеристиці від точки б до точки N на рис..2.38,б;

– коли двигун при розгоні досягне значення швидкості ω_{cm} (яка відповідає точці N на рис.2.38,б) настає сталий режим роботи двигуна з електромагнітним моментом M , що дорівнює статичному моменту M_c .

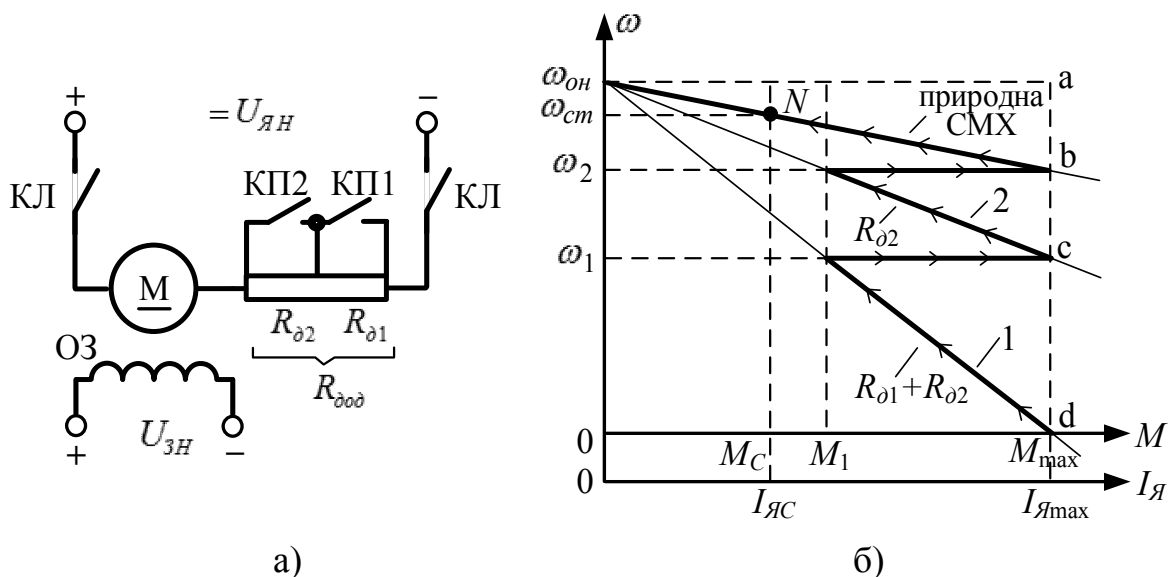


Рис. 2.38 Ілюстрація способу пуску ДПС незалежного збудження за допомогою введення в ланцюг якоря ступенів додаткового резистора $R_{\text{доd}}$ (а – силова частина електричної схеми ЕП; б – статичні механічні характеристики при пуску ДПС; стрілками показані годографи зміни СМХ двигуна при його розгоні)

Наведемо порядок розрахунку ступенів додаткового резистору для розглянутого способу пуску ДЛС незалежного збудження:

1) стосовно до типу двигуна, що використовується в ЕП, будується СМХ (вид якої показано на рис.2.6), для чого згідно залежностям (2.13)-(2-15) попередньо визначаються:

– номінальне значення M_H моменту двигуна:

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H}, \quad (2.47)$$

де P_{2H} та ω_H – номінальні значення корисної потужності і частоти обертання ротору (швидкості) двигуна відповідно;

– добуток конструктивної сталої c двигуна на номінальне значення Φ_H магнітного потоку:

$$c\Phi_H = \frac{M_H}{I_{яH}}, \quad (2.48)$$

де $I_{яH}$ – номінальне значення якірного струму двигуна;

– номінальне значення E_H електрорушійної сили двигуна:

$$E_H = U_{яH} - I_{яH} R_{я}, \quad (2.49)$$

де $R_{я}$ – опір обмотки якоря (знаходиться з довідкових даних для типу двигуна, що застосовується);

– номінальне значення $\omega_{он}$ основної швидкості, яке знаходиться з формули (2.19);

– проведши пряму лінію через дві точки: $(M = 0, \omega = \omega_{он})$ і $(M = M_H, \omega = \omega_H)$ на механічній діаграмі, побудуємо природну СМХ двигуна на рис.2.38,б;

2) визначаємо для першої ступені додаткового резистора (що відповідає пуску зупиненого двигуна):

– значення додаткового резистора $R_{доп1}$ для першої ступені з формули (2.46);

– максимально-припустиме значення електромагнітного моменту двигуна:

$$M_{\max} = c\Phi_H I_{я\max}, \quad (2.50)$$

де $I_{я\max}$ – максимально-припустиме значення (за умовами комутації на колекторі) якірного струму двигуна (уточнене значення приводиться в довідкових даних на тип двигуна, що застосовується);

– провівши пряму лінію через дві точки: $(M = 0, \omega = \omega_{он})$ і $(M = M_{\max}, \omega = 0)$ на механічній діаграмі, побудуємо штучну СМХ двигуна на рис.2.38,б, що відповідає першій ступені пуску (крива 1);

3) обравши необхідну кількість ступенів (звичайно від двох до п'яти) перемикання додаткових резисторів, слід побудувати бажані пускові СМХ

двигуна, які відповідають ступеням додаткових резисторів (аналогічні за виглядом показаним на рис.2.38,б);

4) решта (окрім відповідної першій ступені) СМХ повинні також виходити із загальної точки ($M = 0, \omega = \omega_{он}$) та бути обрані так, що при пуску завжди виконувалась умова: $M_1 > M_c$ (де M_1 – мінімальне значення електромагнітного моменту двигуна в процесі пуску за бажаними СМХ);

5) розрахунок опорів додаткових резисторів для ступенів вище першої здійснюється з співвідношень:

$$\frac{R_{Я} + R_{дод1}}{ad} = \frac{R_{Я} + R_{дод2}}{ac} = \dots = \frac{R_{Я}}{ab}, \quad (2.51)$$

які справедливі для будь-якої кількості ступенів.

Наприкінці звернемо увагу на те, що зі збільшенням кількості ступенів додаткового резистора збільшується мінімальне значення пускового моменту M_1 , а отже і середнє значення $M_{сер.пуск}$ пускового електромагнітного моменту двигуна:

$$M_{сер.пуск} = 0,5(M_1 + M_{max}), \quad (2.52)$$

на пусковій механічній діаграмі ДПС незалежного збудження на рис.2.38,б. З врахуванням цього збільшення кількості ступенів додаткового резистора (що включаються в ланцюг якоря) необхідно здійснювати при релейно-контакторному керуванні електроприводами з важкими умовами пуску, які виникають при великих значеннях статичного моменту M_c привода впродовж режиму пуску

2.7.3 Пуск ДПС незалежного збудження у функції часу

Релейно-контакторна схема пуску ДПС з незалежним збудження (НЗ) у дві ступені у функції часу, яка наведена на рис.2.39, містить наступні умовні позначення: Q1 й Q2 – автоматичні вимикачі; КнП й КнС – кнопки “Пуск” і “Стоп” (здійснюють команди відповідно на пуск або зупинку двигуна); КЛ – лінійний контактор; КП1 й КП2 – контактори прискорення; РЧ1 й РЧ2 – реле часу (формують витримку часу при вимиканні реле).

Розглянемо роботу даної схеми. Увімкнувши автоматичний вимикач Q1, подамо номінальну напругу на обмотку збудження ОЗ двигуна, в двигуні від дії даної обмотки створюється магнітний потік на рівні номінального значення: $\Phi = \Phi_n$. Після подачі напруги =220В (оперативні ланцюги) на схему керування миттєво (без витримки часу) включаються через нормально замкнені контакти контакторів КЛ і КП1 реле часу РЧ1 і РЧ2. При цьому нормально-замкнені контакти цих реле розімкнуться. Після включення автоматичного вимикача Q2 та натискання кнопки “Пуск” КнП включиться лінійний контактор КЛ і стане на самопідхоплення (оскільки нормально розімкнутий блок-контакт цього контактора замкнеться і зашунтує кнопку КнП). Одночасно з цим замкнеться силовий контакт КЛ в ланцюгу якоря двигуна, з’явиться якірний струм і двигун почне розганятись (як показано на рис.2.38,б по ділянці 1 СМХ та згідно

часових діаграм, наведених на рис.2.40) при повному додатковому опорі, що дорівнює: $R_{\partial 1} + R_{\partial 2}$.

Одночасно з включенням контактора КЛ (через його розімкнений нормально-замкнений контакт) знеструмиться котушка реле РЧ1 та з витримкою часу t_1 замкнеться його нормально-замкнений контакт в ланцюгу котушки контактора прискорення КП1, після чого контактор КП1 включиться. Своїм силовим контактом контактор КП1 зашунтує (виключить з роботи) додатковий опір $R_{\partial 1}$. При цьому збільшиться якірний струм і відповідно електромагнітний момент двигуна і його розгін продовжиться на іншій більш жорсткій штучній СМХ (по ділянці 2 прямої на рис.2.38,б).

Разом з ввімкнення контактора КП1 знеструмиться котушка реле РЧ2 та з витримкою часу $(t_2 - t_1)$ замкнеться його нормально-замкнений контакт в ланцюгу котушки контактора прискорення КП2, після чого контактор КП2 включиться. Своїм силовим контактом контактор КП2 зашунтує (виключить з роботи) додатковий опір $R_{\partial 2}$. При цьому (згідно рис.2.38,б) двигун переходить на роботу на природну СМХ, збільшиться якірний струм і відповідно електромагнітний момент двигуна і (оскільки додатковий опір повністю виключено з роботи), після чого розгін двигуна продовжиться на природній СМХ до сталої швидкості ω_{cm} . Таким чином реле часу РЧ1 формує при вимиканні витримку часу t_1 , а реле РЧ2 – витримку, що дорівнює $(t_2 - t_1)$, які показані на рис.2.40.

Команду на зупинку привода здійснюють натисканням кнопки “Стоп” КНС, після чого знеструмиться котушка лінійного контактора КЛ, відключиться його силовий контакт і знеструмиться якірна обмотка двигуна. Внаслідок чого електромагнітний момент двигуна стане дорівнювати нулю, двигун гальмується на “вибігу” під дією статичного моменту опору M_c .

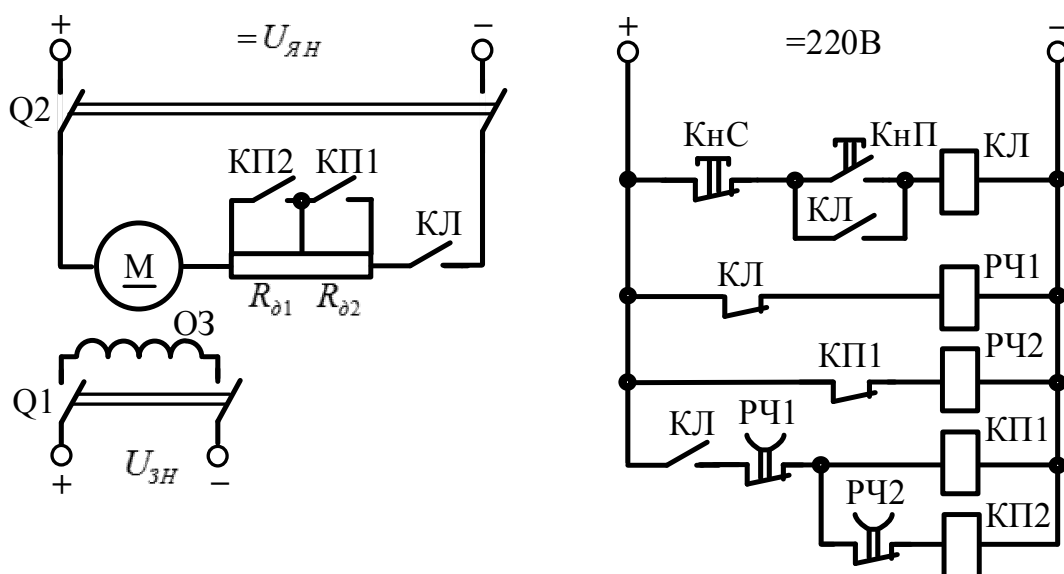


Рис.2.39 Схема пуску ДПС незалежного збудження у дві ступені у функції часу

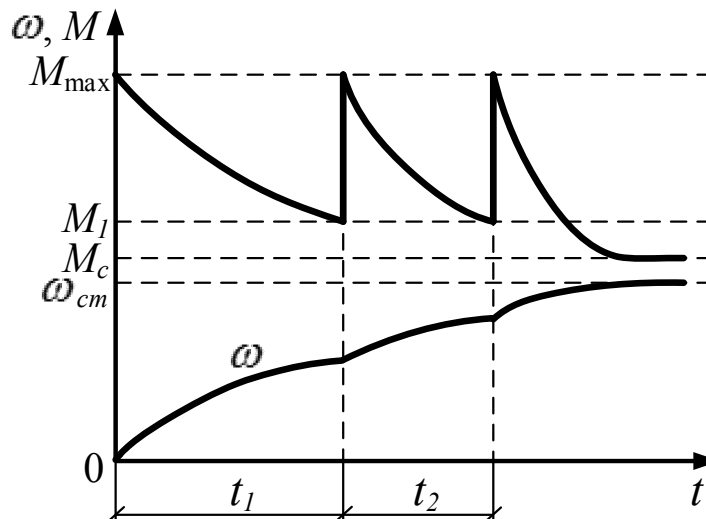


Рис.2.40 Діаграми пуску ДПС незалежного збудження у дві ступені у функції часу

Звернемо увагу на те, що визначення витримок часу для реле РЧ1 й РЧ2 можна здійснювати аналітичним або графоаналітичним методами розрахунку механічних процесів привода (які були раніше розглянуті в п.1.9).

2.7.4 Пуск ДПС незалежного збудження у функції ЕРС

Релейно-контакторна схема пуску ДПС з НЗ у дві ступені у функції електрорушійної сили (ЕРС) наведена на рис.2.41 і вона містить наступні умовні позначення: Q – автоматичний вимикач; КнП й КнС – кнопки “Пуск” і “Стоп” (здійснюють команди відповідно на пуск або зупинку двигуна); КЛ – лінійний контактор; КП1 й КП2 – контактори прискорення. За допомогою змінних резисторів R_1 й R_2 налаштовується струм включення контакторів КП1 й КП2 при значеннях швидкості ω_1 й ω_2 двигуна відповідно.

Схема на рис.2.41 функціонує наступним чином. При включенні автоматичного вимикача Q подається номінальне значення напруги на обмотку збудження ОЗ двигуна (яка створює номінальний магнітний потік Φ_n) та релейно-контакторну схему керування. Після натискання кнопки КнП включається лінійний контактор КЛ. Оскільки на початку пуску електрорушійна сила двигуна дорівнює нулю, то напруга на котушках контакторів КП1 і КП2 мала, ці контактори відключені. Тому на двигун подається напруга $U_{ян}$ через дві послідовно підключені ступені додаткового резистора, двигун починає розганятись при повному додатковому опорі, що дорівнює $R_{\delta 1} + R_{\delta 2}$. В моменти часу t_1 й t_2 (які відповідають досягненню двигуном швидкості ω_1 й ω_2 на рис.2.38,б та рис.2.40) відповідно відбувається шунтування додаткового резистора $R_{\delta 1}$ (контактором КП1) та додаткового резистора $R_{\delta 2}$ (контактором КП2). Після чого двигун розганяється на природній СМХ до сталої швидкості.

Статичні механічні характеристики та часові діаграми, що відповідають режиму розгону для ДПС незалежного збудження у дві ступені у функції ЕРС, повністю ідентичні СМХ та часовим діаграмам, представленим на рис.2.38,б та 2.40 відповідно.

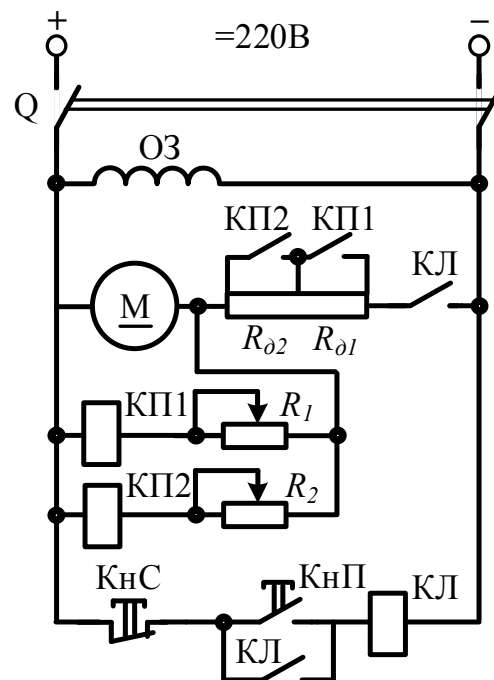


Рис.2.41 Схема пуску ДПС незалежного збудження у дві ступені у функції ЕРС

Значення ЕРС, що відповідають швидкостям ω_1 й ω_2 на рис.2.38,б (при яких відбувається включення контакторів КП1 і КП2 в схемі на рис.2.41) визначаються з наступних співвідношень:

$$U_{я1} = E_1 - I_{я} R_{я} \approx E_1 = c \Phi_H \omega_1, \quad (2.53)$$

$$U_{я2} = E_2 - I_{я} R_{я} \approx E_2 = c \Phi_H \omega_2. \quad (2.54)$$

2.7.5 Пуск ДПС незалежного збудження в одну ступінь у функції струму

Релейно-контакторна схема пуску ДПС з НЗ в одну ступінь у функції струму, яка наведена на рис.2.42, містить: Q – автоматичний вимикач; КНП й КНС – кнопки “Пуск” і “Стоп” (здійснюють команди відповідно на пуск або зупинку двигуна); КЛ – лінійний контактор; КП – контактор прискорення; КА – струмове реле; Р – проміжне реле.

Струмове реле КА включається при $I_{я} \geq I_{я1}$, а відключається при $I_{я} \leq I_{я2}$ (де $I_{я1} > I_{я2}$). Проміжне реле Р характеризується тим, що його час включення й виключення більше, ніж струмового реле КА)

суттєво збільшується) застосовуються більш ефективні способи гальмування ДПС незалежного збудження в релейно-контакторних схемах керування:

- динамічне гальмування;
- гальмування противвімкненням.

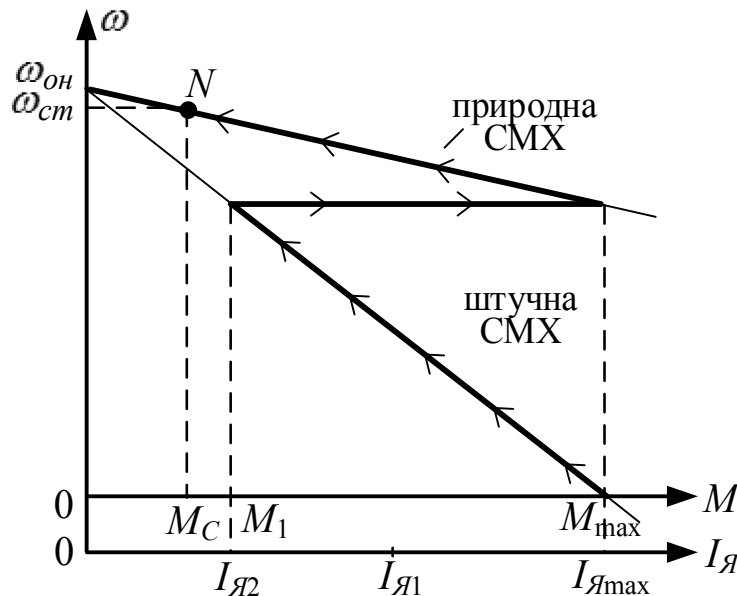


Рис.2.43 Схема пуску ДПС паралельного збудження у функції струму в одну ступінь

2.7.6 Динамічне гальмування двигуна постійного струму незалежного збудження

Динамічне гальмування (ДГ) – це такий вид гальмування ДПС, при якому якір двигуна відключається від мережі постійного струму й паралельно якорю підключається гальмівний резистор R_{Γ} .

На рис.2.44 представлена схема, що ілюструє режим динамічного гальмування ДПС незалежного збудження. В даному двигуневому режимі роботи замкнуті контакти контактора КЛ і розімкнені контакти контактора КГ,

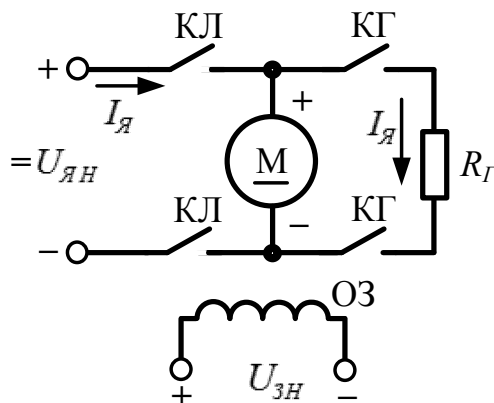


Рис.2.44 Схема, що забезпечує динамічне гальмування ДПС незалежного збудження

обмотка якоря М живеться постійною номінальною напругою $U_{яН}$, а обмотка збудження ОЗ – постійною номінальною напругою збудження $U_{зН}$.

При переводі двигуна до режиму динамічного гальмування змінюється стан контактів: нормально відкриті контакти контактора КЛ розмикаються, а нормально відкриті контакти контактора КГ – замикаються. В результаті цього якірна обмотка М двигуна відключається від джерела постійної напруги $U_{яН}$ і паралельно їй підключається гальмівний резистор R_{Γ} .

Розглянемо математичний опис режиму ДГ (при поточній швидкості ω й номінальному магнітному потоку Φ_H). Рівняння рівноваги напруг в режимі динамічного гальмування буде мати вигляд:

$$0 = E + I_{я}(R_{я} + R_{\Gamma}), \quad (2.55)$$

оскільки якір двигуна відключено від мережі. З врахуванням, що:

$$\left. \begin{aligned} E &= -I_{я}(R_{я} + R_{\Gamma}), \\ E &= c\Phi_H\omega \end{aligned} \right\}, \quad (2.56)$$

запишемо вираз для обчислення струму якоря:

$$I_{я} = \frac{-E}{R_{я} + R_{\Gamma}} = \frac{-c\Phi_H\omega}{R_{я} + R_{\Gamma}}. \quad (2.57)$$

Розглянемо вибір гальмівного резистора R_{Γ} . При виборі даного резистора R_{Γ} треба, щоб виконувалась наступна умова:

$$|I_{я}| \leq I_{я\max} \approx (2 - 2,5)I_{яН}, \quad (2.58)$$

або

$$\left| \frac{-E_{\max}}{R_{я} + R_{\Gamma}} \right| = \left| \frac{-c\Phi_H\omega_{ОН}}{R_{я} + R_{\Gamma}} \right| \leq I_{я\max}, \quad (2.59)$$

де $\omega_{ОН}$ – номінальна основна швидкість.

З останньої залежності випливає:

$$R_{я} + R_{\Gamma} \geq \left| \frac{c\Phi_H\omega_{ОН}}{I_{я\max}} \right|, \quad (2.60)$$

звідки отримуємо співвідношення для вибору резистора R_{Γ} :

$$R_{\Gamma} \geq \frac{c\Phi_H\omega_{ОН}}{I_{я\max}} - R_{я}, \quad (2.61)$$

Виходячи із співвідношень (2.57) з врахуванням (2.15) розрахуємо статичну механічну характеристику $\omega(M)$ для ДПС незалежного збудження при динамічному гальмуванні

$$\omega = -\frac{R_{я} + R_{\Gamma}}{c\Phi_H} I_{я} = -\frac{R_{я} + R_{\Gamma}}{(c\Phi_H)^2} M. \quad (2.62)$$

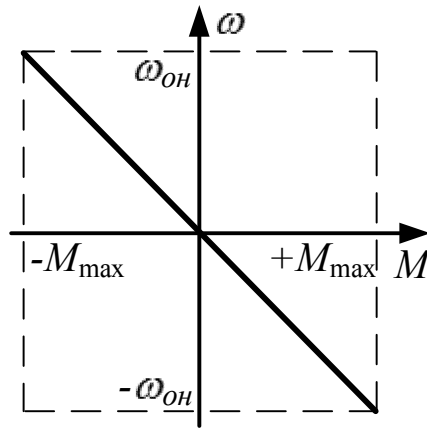


Рис.2.45 Статична механічна характеристика ДПС незалежного збудження в режимі динамічного гальмування

Згідно (2.62) статична механічна характеристика ДПС незалежного збудження представляє собою похилу пряму лінію (що наведена на рис.2.45), яка розташована в II і IV квадрантах механічної діаграми привода, а також проходить через центр (точка О) механічної діаграми. При цьому мінімальне та максимальне значення гальмівного моменту визначаються із співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} -M_{\max} &= -c\Phi_H I_{Я\max} \\ +M_{\max} &= c\Phi_H I_{Я\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

де Φ_H – номінальний магнітний потік двигуна;

c – конструктивна постійна двигуна;

$I_{Я\max}$ – максимально припустиме значення якірної струму двигуна.

Порівняємо між собою еквівалентні схеми заміщення ДПС незалежного збудження на рис.2.46, що відповідають двигуневому режиму (замкнені н.в. контакти КЛ, а розімкнуті н.в. контакти КГ в схемі на рис.2.44) і режиму динамічного гальмування (розімкнуті н.в. контакти КЛ замкнуті н.в. контакти КГ в схемі на рис. 2.44). При цьому схема заміщення на рис.2.46,б отримана зі схеми на рис.2.46,а з врахуванням того, що в режимі ДГ значення якірної напруги $U_{Я}$ двигуна дорівнює нулю і сумарний опір в ланцюгу якоря дорівнює: $R_{Я} + R_{Г}$. Характерною відмінністю між собою зазначених схем на рис. 2.46,а,б є: по-перше, те що в першій схемі (а) для двигуневому режиму якірний струм $I_{Я}$ протилежний напрямку ЕРС двигуна, а в другій схемі (б) – співпадає з напрямком зазначеної ЕРС. По-друге, при переході до режиму ДГ змінюється на протилежний знак якірної струму $I_{Я}$ (що з врахуванням прямо пропорційної залежності електромагнітного моменту двигуна від якірної струму при незмінному номінальному значенні магнітного потоку Φ_H приводить до зміни знаку електромагнітного моменту M на протилежний, тобто – до тормозного режиму)

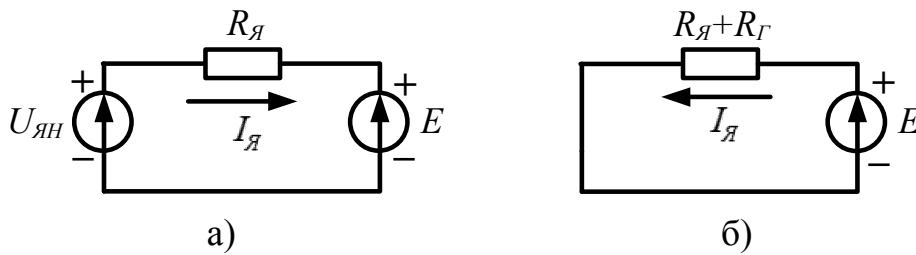


Рис.2.46 Схема заміщення ДПС незалежного збудження для: а – двигунового режиму; б – режиму динамічного гальмування

Розглянемо релейно-контакторну схему пуску в одну ступінь й динамічного гальмування ДПС незалежного збудження, яка представлена на рис.2.47. Дана схема містить наступні позначення: Q – автоматичний вимикач; КЛ – лінійний контактор; КП – контактор прискорення; КГ – контактор гальмування; РЧ – реле часу (з витримкою на вимикання); КП – контактор прискорення; КнП й КнС – кнопки “Пуск” і “Стоп” (здійснюють команди відповідно на пуск або зупинку двигуна).

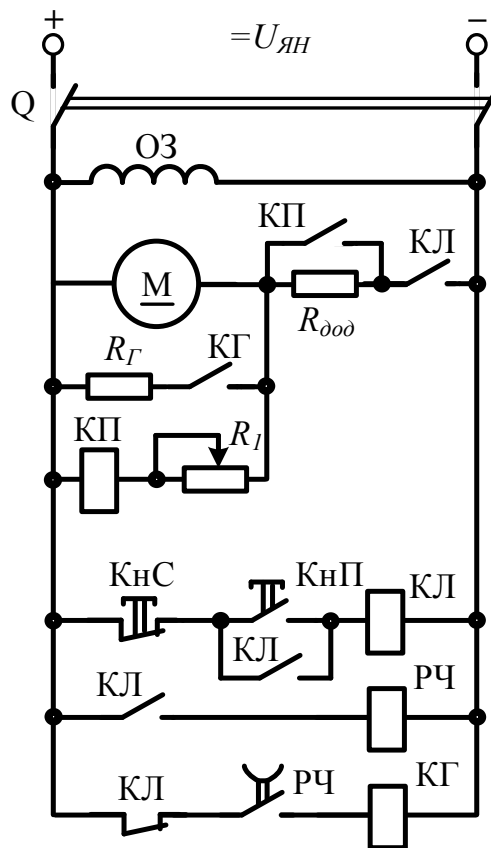


Рис.2.47 Схема пуску в одну ступінь й динамічного гальмування ДПС незалежного збудження.

Перед пуском привода включають автоматичний вимикач Q, подається номінальна напруга на обмотку збудження ОЗ (яка створює номінальний магнітний потік двигуна) і на релейно-контакторну схему керування. При

цьому котушки контакторів КЛ та КГ, реле часу РЧ знеструмлені, напруга на якорі двигуна відсутня, двигун знаходиться в зупиненому стані.

Для здійснення пуску двигуна натискають кнопку “Пуск” КнП, включається контактор КЛ та його катушка становиться на самопідхоплення, включається реле часу РЧ, контактор КГ залишається знеструмленим (оскільки н.з. контакт КЛ розімкнутий). При зупиненому стані або малих швидкостях двигуна контактор КП відключений, його н.в. контакт (який підключений паралельно додатковому резистору $R_{доd}$) розімкнутий, струм до якірної обмотки М двигуна протікає через згаданий додатковий резистор $R_{доd}$, відбувається режим пуску двигуна за штучною СМХ (по ділянці 1-2 на рис.2.48).

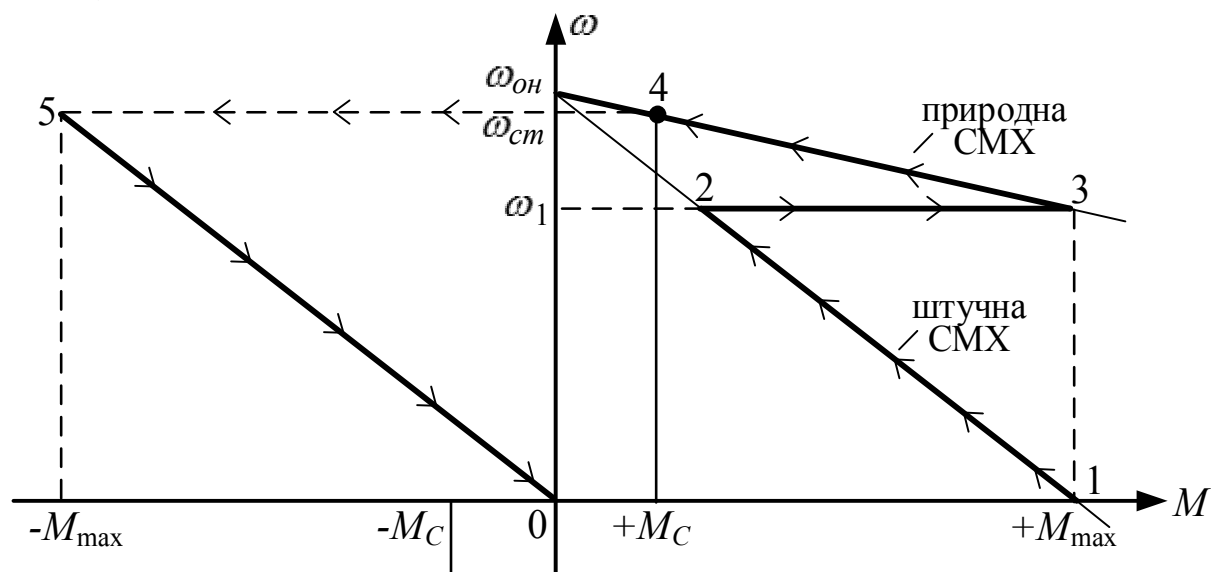


Рис.2.48 Статичні механічні характеристики ДПС незалежного (паралельного) збудження при пуску в одну ступінь й динамічному гальмуванні

Зі збільшенням швидкості ω при розгоні приблизно прямо пропорційно збільшується напруга і струм на котушці контактора КП. При досягненні двигуном значення швидкості ω_1 контактор КП включається (регулювання значення швидкості, при якій включається контактор КП, здійснюється за допомогою змінного резистору R_1). Після цього шунтується н.в. контактом КП додатковий резистор $R_{доd}$, двигун переходить на природну статичну механічну характеристику (з точки 2 до точки 3 на рис.2.48). Подальший розгін двигуна (до сталої швидкості $\omega_{ст}$) відбувається на ділянці 3-4 природної СМХ.

Розглянемо роботу схеми на рис.2.47 в режимі динамічного гальмування. Для зупинки двигуна натискаємо кнопку “Стоп” КнС, після чого виключається контактор КЛ і включається контактор КГ. Відбувається динамічне гальмування на час, доки не закінчиться витримка часу та не відключиться реле РЧ (яке своїм н.в. контактом знеструмить катушку контактора КГ). При цьому витримка часу реле РЧ (що визначає тривалість динамічного гальмування)

налаштовується таким чином, що б в момент відключення контактора КГ швидкість двигуна дорівнювала нулю: $\omega = 0$.

На рис.2.48 наведені статичні механічні характеристики ДПС незалежного збудження, які відповідають режимам пуску й гальмування даного двигуна в релейно-контакторній схемі керування на рис.2.47

З проведеного аналізу режиму динамічного гальмування ДПС незалежного збудження випливає:

1) динамічне гальмування здійснюється при обох напрямках обертання (полярностях швидкості) двигуна та забезпечує гальмування електропривода в II й IV квадрантах механічної діаграми;

2) вибір гальмівного резистора R_r повинен бути таким, щоб якірний струм не перевищував його максимально-припустимого значення: $|I_{я}| \leq I_{я\max}$;

3) значення гальмівного моменту лінійно залежить від швидкості ω двигуна (а при швидкості, що дорівнює нулю, гальмівний момент двигуна теж дорівнює нулю);

4) кінетична енергія машини при динамічному гальмуванні перетворюється в електричну й розсіюється на активному опорі R_r (і мала частина – на опорі якоря $R_{я}$). Тому, на відміну від генераторного режиму гальмування (яке досягається при регулюванні якірної напруги в ДПС незалежного збудження), динамічне гальмування неекономічне, характеризується втратами енергії в резисторі R_r ;

5) областю застосування динамічного гальмування є електроприводи постійного струму, в яких режими гальмування рідкі (у порівнянні з основним двигуневим режимом роботи).

Особливо часто застосовується динамічне гальмування в якості аварійного гальмування в тиристорних ЕП постійного струму. При цьому у випадку зникнення напруги мережі на тиристорному перетворювачі або при виході з ладу силових елементів тиристорного перетворювача автоматично включається динамічне гальмування (яке забезпечує гарантовану і без механічних ударів зупинку привода).

Наприклад, злитковіз керується від тиристорного електропривода постійного струму. В нормальному режимі здійснюється генераторне гальмування з поверненням енергії до електричної мережі.

При зникненні напруги мережі ТП або при виході його елементів з ладу, автоматично включається динамічне гальмування і забезпечує зупинку злитковозу. Якщо цього не зробити, він за інерцією може зламати всі огороження і привести до несправності в механіці (при гальмуванні механічним гальмом).

2.7.7 Гальмування противімкненням ДПС незалежного збудження

Гальмування противімкненням (ГПВ) – це такий вид гальмування двигуна постійного струму, при якому змінюється полярність напруги, що прикладається до якірної обмотки двигуна, й послідовно з цією обмоткою

включається гальмівний опір (резистор). На рис.2.49 наведена схема, що ілюструє режим гальмування проти ввімкненням ДПС незалежного збудження. В цій схемі в двигуновому режимі роботи контакти КВ замкнуті, а контакти КН – розімкнуті. При переході до режиму гальмування противввімкненням (при тому ж напрямку швидкості, що і в двигуновому режимі) – навпаки, контакти КВ розімкнені, а контакти КН – замкнуті.

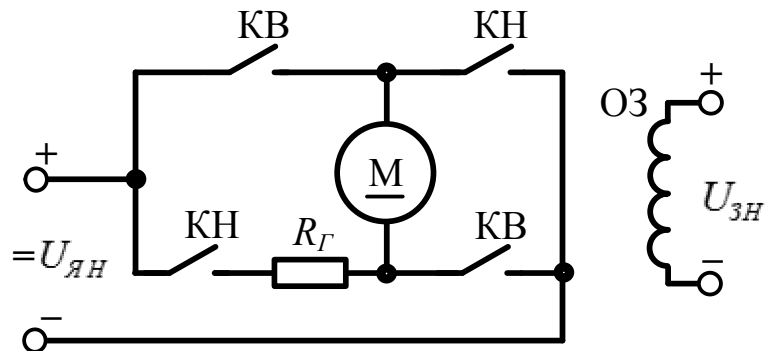


Рис.2.49 Схема, що ілюструє перехід ДПС незалежного збудження від двигунового режиму до режиму гальмування противввімкненням

Виходячи зі схеми на рис. 2.49 складемо еквівалентні схеми заміщення ДПС незалежного збудження, які наведені на рис.2.50 (а – для двигунового режиму; б – для режиму гальмування противввімкненням).

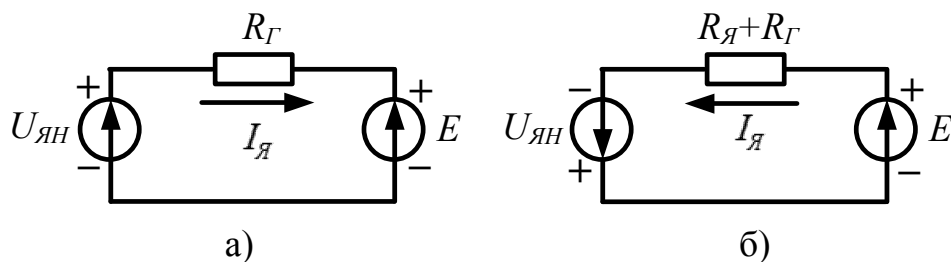


Рис.2.50 Еквівалентні схеми заміщення електропривода постійного струму: а – в двигуновому режимі; б – в режимі ГПВ

Порівняємо між собою еквівалентні схеми заміщення на рис.2.50 а,б та проаналізуємо їх відмінності. По-перше, в двигуновому режимі якірна напруга $U_{яH}$ й електрорушійна сила E направлені зустрічно один до одного, а в режимі ГПВ – направлені в одну сторону. По-друге, після переходу з двигунового режиму в режим ГПВ змінюється на протилежний напрямок протікання якірного струму (а, отже, з врахуванням прямо пропорційної залежності електромагнітного моменту M від якірного струму $I_{я}$ при незмінному магнітному потоці Φ_H , змінюється напрямок електромагнітного моменту двигуна, який стає гальмівним).

Розглянемо вибір гальмівного резистора R_r . Згідно зі схемами заміщення, що наведені на рис. 2.50, рівняння рівноваги напруг для початку режиму гальмування противввімкненням буде мати вигляд:

$$-U_{яН} = E + I_{я}(R_{я} + R_{г}), \quad (2.64)$$

який можна перетворити до іншого вигляду:

$$E + U_{яН} = I_{я}(R_{я} + R_{г}). \quad (2.65)$$

З останнього виразу знайдемо залежність для якірного струму двигуна в режимі ГПВ:

$$I_{я} = -\frac{E + U_{яН}}{R_{я} + R_{г}} = -\frac{c\Phi_H \omega + U_{яН}}{R_{я} + R_{г}}, \quad (2.66)$$

де

$$E = c\Phi_H \omega - \quad (2.67)$$

поточне значення електрорушійної сили двигуна.

З врахуванням умови не перевищення в режимі ГПВ якірним струмом $I_{я}$ його максимально припустимого значення: $|I_{я}| \leq I_{я\max}$ здійснимо з рівняння (2.66) вибір гальмівного резистора $R_{г}$ у вигляді:

$$R_{г} \geq \frac{|E_{\max} + U_{яН}|}{I_{я\max}} - R_{я}, \quad (2.68)$$

де

$$E_{\max} = c\Phi_H \omega_{ОН} - \quad (2.69)$$

максимальне значення електрорушійної сили двигуна;

$\omega_{ОН}$ – номінальне значення основної швидкості двигуна

Підставивши в залежність (2.64) співвідношення (2.67) для ЕРС двигуна, після перетворення отримаємо вираз:

$$\omega = -\frac{U_{яН}}{c\Phi_H} - \frac{(R_{я} + R_{г})}{c\Phi_H} I_{я}. \quad (2.70)$$

Підставивши в останній вираз співвідношення (2.15), яке зв'язує між собою електромагнітний момент M і якірний струм $I_{я}$ двигуна, отримаємо залежність для статичної механічної характеристики ДПС незалежного збудження в режимі гальмування проти ввімкненням:

$$\omega = -\frac{U_{яН}}{c\Phi_H} - \frac{(R_{я} + R_{г})}{(c\Phi_H)^2} M. \quad (2.71)$$

Графічний вигляд статичної механічної характеристики (2.71) для ДПС незалежного збудження в режимі ГПВ наведені на рис. 2.51. На цьому рисунку вважаємо, що у початковий момент часу ДПС функціонував зі сталим значенням швидкості $\omega_{ст}$ в двигуновому режимі в точці 1 на природній механічній характеристиці. Після перевodu в режим ГПВ двигун переходить з тією ж швидкістю з точки 1 в точку 2 ділянки 2-3 прямої лінії, що відповідає СМХ для режиму ГПВ на рис.2.51. При чому нахил цієї СМХ залежить від величини гальмівного резистора $R_{г}$. В режимі ГПВ на якір двигуна подається напруга від'ємної полярності $-U_{яН}$, яка відповідає зворотному напрямку обертання ($\omega < 0$) сталої швидкості двигуна, хоча двигун ще обертається в прямому напрямку (зі швидкістю $\omega > 0$). Як впливає з годографа 2-3 на

рис.2.51, в режимі ГПВ створюється від'ємний (гальмівний) електромагнітний момент двигуна, внаслідок чого швидкість двигуна зменшується і досягає нульового значення в точці 3.

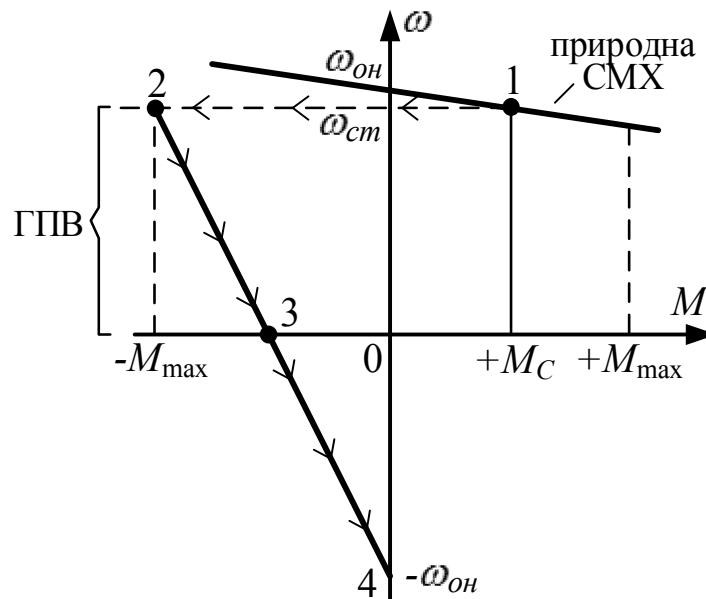


Рис.2.51 Статична механічна характеристика ДПС незалежного збудження в режимі гальмування противвімкненням

Після даної точки на ділянці годографа 3-4 електромагнітний момент M двигуна залишається від'ємним і двигун починає під дією цього моменту розганятися в протилежну сторону ($\omega < 0$) до значення швидкості, що дорівнює $-\omega_{он}$. Очевидно, з врахуванням раніше розглянутого вибору гальмівного резистору R_r для режиму ГПВ в двигуні постійного струму незалежного збудження буде здійснюватися обмеження мінімального ($-M_{max}$) і максимального ($+M_{max}$) припустимих значень на рівні з (2.63).

Розглянемо схему керування пуском (у дві ступені) й реверсом (противвімкненням) ДПС незалежного збудження, яка представлена на рис.2.52 та містить наступні умовні позначення: КК – командоконтролер; КЛ – лінійний контактор; КВ і КН – контактори “Вперед” і “Назад”; КПр – контактор противвімкнення; КП1 і КП2 – контактори прискорення; РПВ і РПН – проміжні реле “Вперед” і “Назад”; РЧ1 і РЧ2 – реле часу (з витримкою часу на вимикання); R_{np} – резистор противвімкнення; $R_{\partial 1}$ і $R_{\partial 2}$ – резистори прискорення.

Командоконтролер КК має три положення:

- нейтральне (0), в якому всі його контакти розімкнені;
- “Вперед” (В), в якому замкнуті верхній та середній його контакти;
- “Назад” (Н), в якому замкнуті верхній та нижній його контакти.

При чому, для позначення замкнених станів контактів командоконтролера КК слугує жирна крапка на його схемі.

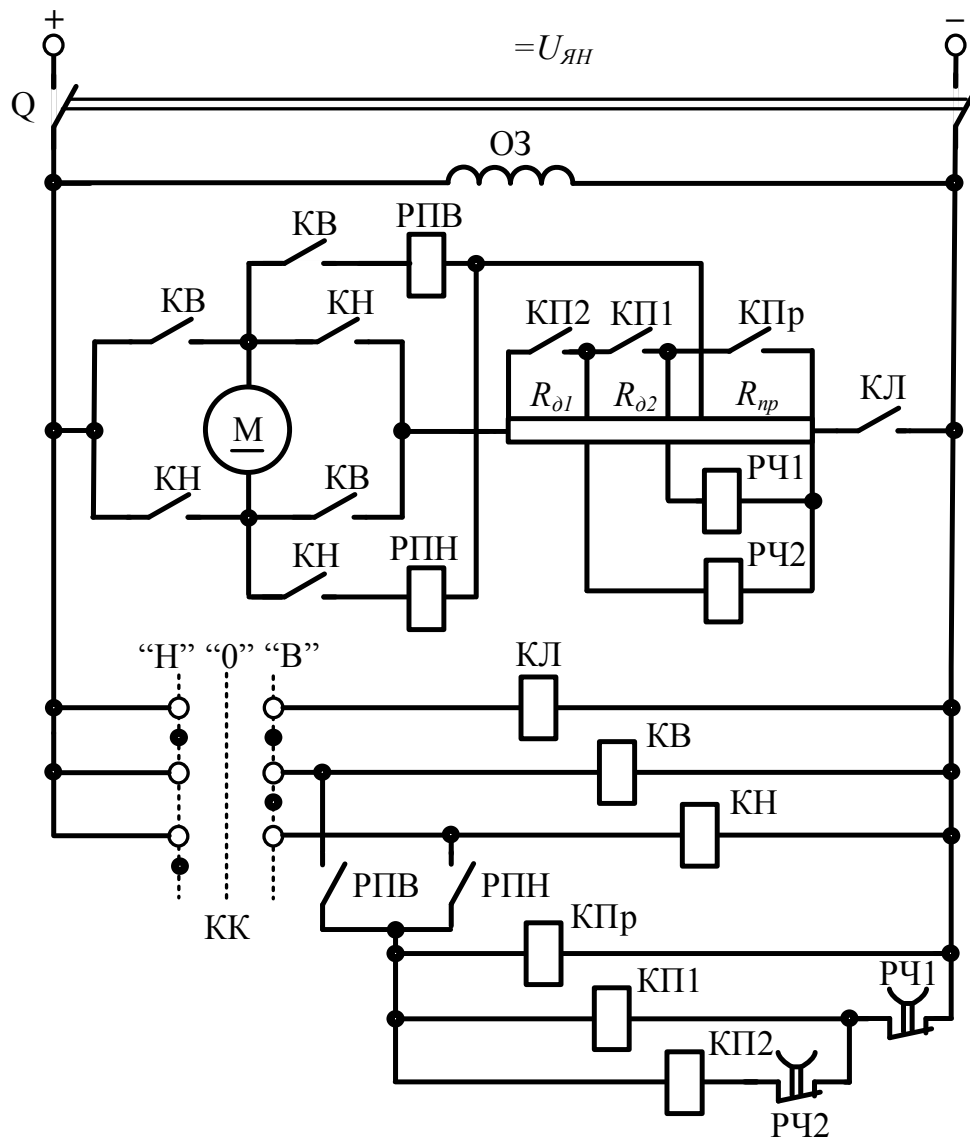


Рис.2.52 Схема керування пуском й реверсом ДПС незалежного збудження (пуск – у дві ступені; гальмування – противвімкненням).

Статичні механічні характеристики ДПС незалежного збудження, які відповідають роботі релейно-контакторній схемі керування пуском та реверсом цього двигуна, наведені на рис.2.53.

Розглянемо роботу схеми на рис.2.52. Після включення автоматичного вимикача Q подається постійна напруга $U_{ян}$ на релейно-контакторну схему керування та на обмотку збудження ОЗ двигуна, за допомогою якої створюється номінальне значення магнітного потоку Φ_H . Реле часу РЧ1 і РЧ2 підключені паралельно резисторам R_{np} і R_{01} й включаються тільки тоді, коли через ці резистори протікають струми (від падіння напруги на цих резисторах).

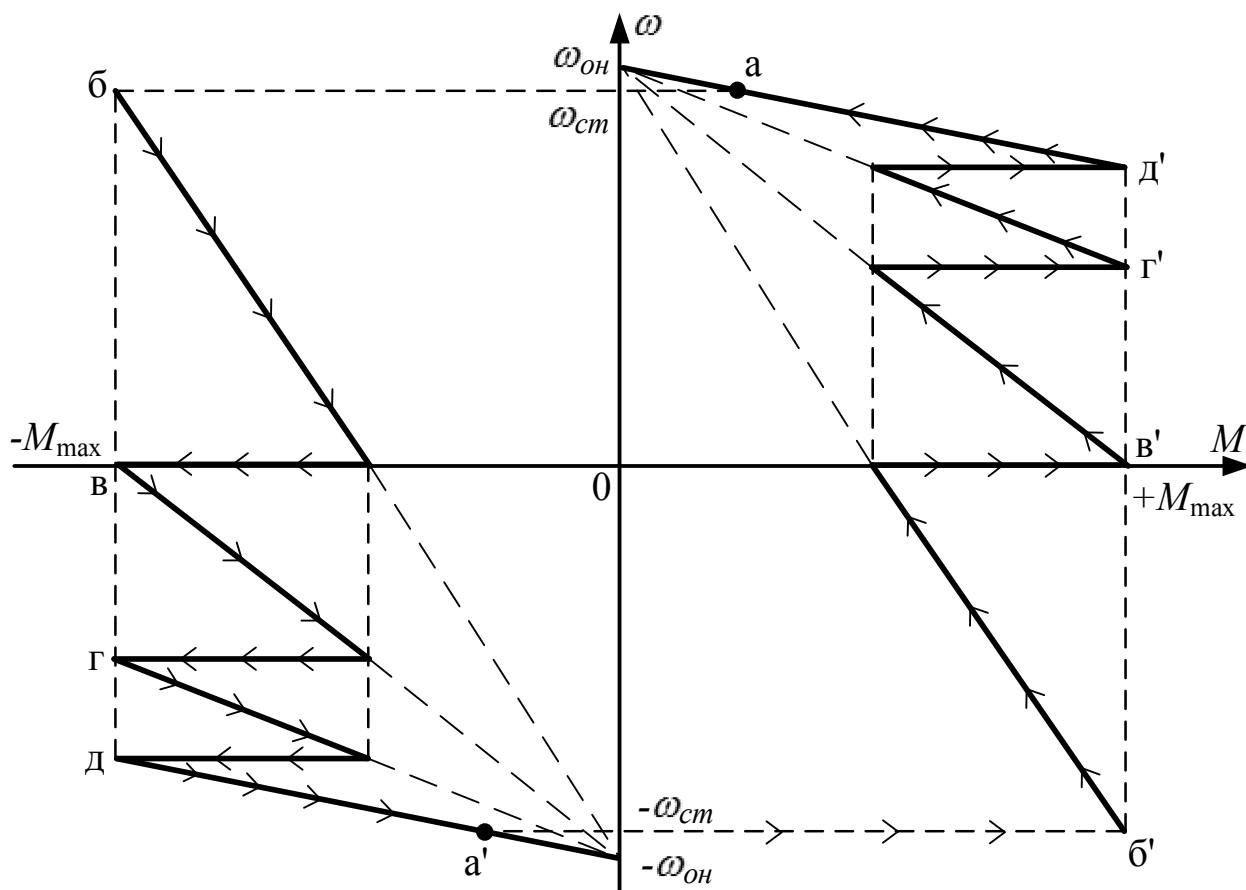


Рис.2.53 Статичні механічні характеристики ДПС незалежного збудження при пуску й реверсу

Одні з виводів реле РПВ і РПН з'єднані разом й підключені до резистора противвімкнення R_{np} . Таке підключення РПВ і РПН забезпечує їх відключений стан на початку режиму реверса – тільки в режимі проти ввімкнення (коли ЕРС двигуна підключається в одному напрямку з напругою мережі $U_{ян}$) на відрізках: а – б – в і а' – б' – в', – що показані на рис.2.53.

У вихідному стані рукоятка командоконтролера знаходиться у середньому положенні: відключені лінійний контактор КЛ і контактори КВ й КН. Внаслідок чого на двигуні відсутня напруга й він зупинений.

При задаванні режиму розгону “Вперед” (рукоятка командоконтролера повернута вправо в положення “В”) включається лінійний контактор КЛ і контактор КВ. Двигун включається в електричну мережу зі своїми резисторами прискорення і резистором противвімкнення.

Пусковий струм двигуна викликає падіння напруги на пускових резисторах, внаслідок чого ввімкнуться реле РЧ1 і РЧ2, які своїми контактами відключають обмотки контакторів прискорення КП1 і КП2. При цьому від падіння напруги на пускових резисторах включається реле РПВ, подаючи через свій контакт напругу на обмотку контактора КПр, останній включається. При цьому контакт КПр шунтує резистор R_{np} противвімкнення. Внаслідок цього в

ланцюзі якоря ДПС залишаються підключеними додаткові резистори $R_{\partial 1}$ і $R_{\partial 2}$, двигун почне розганятися. При ввімкненні контактора КПр знеструмиться котушка реле РЧ1 і почнеться відлік часу цього реле. Нормально замкнений контакт реле РЧ1 замкнеться з витримкою часу, підключивши живлення до обмотки прискорюючого контактора КП1. Даний контактор включиться і зашунтує своїм контактом першу ступінь пускового резистора $R_{\partial 1}$.

Як тільки зазначений резистор $R_{\partial 1}$ зашунтовано, відключається реле часу РЧ2 і починає відлік свого часу. По закінченні витримки часу замикається нормально замкнений РЧ2, включається прискорюючий контактор КП2, шунтується друга ступінь пускового резистора $R_{\partial 2}$. Двигун переходить на роботу на природну механічну характеристику.

При завданні режиму реверса (повернемо рукоятку контролера з положення “В” в “Н”). При цьому залишиться ввімкненим лінійний контактор КЛ, відключиться контактор КВ і включиться контактор КН. Одночасно з цим настає режим противвімкнення (якір ДПС включається згідно напруги мережі $U_{\text{ян}}$), зменшується напруга на реле РПН, це реле залишається відключеним. Як наслідок контактори КПр, КП1 і КП2 також залишаються відключеними, із-за чого в якірному ланцюзі ДПС введені резистори: R_{np} , $R_{\partial 1}$ і $R_{\partial 2}$ (сума яких складає значення опору раніше розглянутого гальмівного резистора R_{Γ}).

По мірі гальмування ДПС і зменшення електрорушійної сили E двигуна збільшується напруга на котушці реле РПН. При швидкості ДПС, близької до нуля (точка “в” на діаграмі) реле РПН включається, подається напруга на контактор КПр, шунтується резистор R_{np} . Знеструмлюється обмотка реле РЧ1, з витримкою часу цього реле включається контактор КП1, шунтуючи першу ступінь пускового резистора $R_{\partial 1}$.

Після шунтування першої ступені $R_{\partial 1}$ контактором КП1, знеструмлюється котушка реле РЧ2. З витримкою часу включається контактор КП2, шунтуючи другу ступінь $R_{\partial 2}$ пускового резистора, ДПС переходить в роботу на природну механічну характеристику.

З аналізу розглянутих аналітичних залежностей та статичних механічних характеристик для режиму гальмування проти ввімкненням ДПС незалежного збудження впливає:

1) гальмування противвімкненням забезпечує гальмування в II і IV квадрантах механічної діаграми; при цьому в I і III квадрантах відбувається розгін ДПС від нульової швидкості до близької до основної зворотнього напрямку (тобто режим ГПВ закінчується розгоном до швидкості, яка протилежна вихідній, яка була до початку гальмування);

2) вибір гальмівного резистора R_{Γ} забезпечує обмеження якірного струму менше припустимого значення: $|I_{\text{я}}| \leq I_{\text{я max}}$;

3) статична механічна характеристика при ГПВ представляє собою відрізок прямої, що проходить через точки: ($\omega = -\omega_{OH}$; $M = 0$) та ($\omega = +\omega_{OH}$; $M = -M_{max}$) – для II квадранта або ($\omega = +\omega_{OH}$; $M = 0$) та ($\omega = -\omega_{OH}$; $M = +M_{max}$) – для IV квадранта; при цьому зі зменшенням швидкості гальмівний момент двигуна лінійно зменшується;

4) кінетична енергія привода при гальмуванні перетворюється в електричну і розсіюється в резисторі R_r , у зв'язку з чим даний вид гальмування є неекономічним;

5) область застосування ГПВ – це електроприводи, в яких здійснюється ефективне гальмування й подальше за цим змінення напрямку обертання (реверс) швидкості ДПС та зазначені режими реверсу рідкі (у порівнянні з тривалістю роботи привода зі сталою швидкістю, близькою до номінальної).

Контрольні питання

1. Призначення та розрахунок додаткових резисторів при релейно-контакторному пуску ДПС незалежного збудження.

2. Релейно-контакторна схема пуску ДПС незалежного збудження (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту).

3. Релейно-контакторна схема пуску ДПС незалежного збудження у функції ЕРС (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту).

4. Релейно-контакторна схема пуску ДПС незалежного збудження у функції струму (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту).

5. Спосіб динамічного гальмування двигуна постійного струму (сутність, еквівалентна схема заміщення, вибір значення гальмівного резистора. вивід аналітичної залежності для СМХ при гальмуванні, переваги та недоліки, область застосування).

6. Релейно-контакторна схема динамічного гальмування ДПС незалежного збудження (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та

якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

7. Спосіб гальмування противвімкненням ДПС незалежного збудження (сутність, еквівалентна схема заміщення, вибір значення гальмівного резистора. вивід аналітичної залежності для СМХ при гальмуванні, переваги та недоліки, область застосування).

8. Релейно-контакторна схема пуском та реверсом ДПС незалежного збудження (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

2.8 Переваги та недоліки електропривода постійного струму, область застосування

Головними перевагами електропривода постійного струму є відносна технічна простота регулювання його робочих координат (електромагнітного моменту і швидкості), що здійснюється (як було розглянуто в п.2.1-2.7) за рахунок регулювання значень якірної напруги (струму) і напруги (струму) збудження двигуна або шляхом введення в ланцюг якірної обмотки додаткового резистора.

Недоліки цього електропривода зумовлені недоліками двигуна постійного струму (що пов'язані з наявністю рухомого електричного контакту між електрографітовими щітками і пластинами колектора):

1) обмеження максимального значення якірного струму на рівні $I_{\text{я}} \leq I_{\text{я max}} = (2 - 2,5) I_{\text{ян}}$ (при порушенні цієї умови починається іскріння на колекторі, перекриття пластин колектора та круговий вогонь на колекторі, що приводять до виходу з ладу електродвигуна);

2) зниження експлуатаційної надійності оскільки потребується регулярна заміна електрографітових щіток, що стираються, а також періодичне розточування пластин колектора (внаслідок їх зношування від тертя по ним щіток);

3) неможливість застосування у вибухонебезпечних, агресивних і запиленних середовищах (через наявність рухомого електричного контакту в колекторі), а створення додаткових зовнішніх герметичних оболонок навколо електродвигуна – технічно складно і дорого.

Рациональною областю застосування електропривода постійного струму є звичайні середовища та закриті приміщення, де відсутні вибухонебезпечні, агресивні і запилені середовища (наприклад, в побутовій техніці, машинобудуванні та ін.)

Контрольні питання

1. Переваги електропривода постійного струму.
2. Недоліки електропривода постійного струму.
3. Область застосування електропривода постійного струму.

3 ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Основні відомості об електроприводі змінного струму та способах керування двигунами змінного струму

Електропривод змінного струму – це електропривод, який створюється на основі трифазних електричних машин змінного струму, найбільш розповсюдженими з яких є:

- 1) трифазний короткозамкнений АД (самий розповсюджений двигун);
- 2) трифазний АД з фазним ротором;
- 3) трифазний синхронний двигун.

При цьому самим масово виготовляємим у світі та найбільш розповсюдженим на практиці є асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором завдяки наступним перевагам:

- 1) простота конструкції;
- 2) відсутність рухомого електричного контакту (у порівнянні з ДПС та іншими видами машин змінного струму), внаслідок чого досягається підвищена експлуатаційна надійність і розширення області застосування на вибухонебезпечні, агресивні і запилені середовища;
- 3) зменшенні маса, габарити і вартість (в 1,5-2 рази у порівнянні з електродвигуном постійного струму тієї ж потужності та частоти обертання);
- 4) зменшений (при тій же потужності і частоті обертання) момент інерції ротора двигуна, що скорочує час пуско-гальмівних режимів.

Основними способами керування для двигунів змінного струму являються:

- частотне;
- фазове;
- релейно-контакторне.

Найбільш економічне керування електродвигунами змінного струму – частотне. Основна сучасна тенденція у розвитку автоматизованого ЕП за кордоном і в Україні – перехід від регульованого ЕП постійного струму й релейно-контакторного керування двигунами змінного струму до частотного керування цими двигунами.

Контрольні питання

1. Основний тип електричних машин змінного струму. Переваги короткозамкненого асинхронного двигуна в порівнянні з двигуном постійного струму та іншими двигунами змінного струму.

2. Основні способи керування короткозамкненим асинхронним двигуном, їх порівняння між собою по якості та економічності регулювання, області застосування вказаних способів.

3.2 Основні математичні залежності та статичні механічні характеристики для короткозамкненого асинхронного двигуна

З навчального курсу електричних машин відомі основні математичні залежності для робочих координат асинхронного двигуна (АД), основні з яких розглянемо нижче.

Синхронна швидкість ω_o – представляє собою швидкість двигуна на холостому ході (тобто при електромагнітному моменті АД, рівному нулю: $M = 0$). При цьому відомо, що синхронна швидкість ω_o дорівнює кутовій частоті обертання магнітного потоку в повітряному зазорі асинхронної машини і розраховується з залежності:

$$\omega_o = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (3.1)$$

де f_1 – частота трифазної статорної напруги;

p – число пар полюсів статорної обмотки АД.

Ковзання s асинхронного двигуна визначається із співвідношення:

$$s = \frac{\Delta\omega}{\omega_o} = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}, \quad (3.2)$$

де ω – фактичне значення кутової частоти обертання (швидкості) ротора двигуна;

$\Delta\omega$ – відхилення між синхронною швидкістю ω_o (або кутовою частотою обертання магнітного потоку) і фактичною швидкістю ω ротора.

Помноживши ліву та праву частини співвідношення (3.2) на значення синхронної швидкості ω_o , а потім розв'язавши отримане рівняння відносно швидкості ω отримаємо математичну залежність, яка зв'язує між собою швидкість ω ротора та ковзання s двигуна:

$$\omega = \omega_o(1 - s). \quad (3.3)$$

Остання залежність свідчить про те, що для асинхронного двигуна швидкість ω ротора та ковзання s двигуна пов'язані між собою лінійною залежністю.

Взаємозв'язок в АД внутрішніх його параметрів та робочих координат зі значенням прикладеної фазної діючої статорної напруги, як відомо з теорії електричних машин, відображається за допомогою “Т”-образної схеми заміщення асинхронного двигуна, що представлена на рис.3.1. В цій схемі прийняті наступні позначення: \dot{U}_1 – діюча фазна статорна напруга АД; R_1 і R'_2 – відповідно активний опір обмотки статора і активний опір обмотки ротора, що приведений до статора; x_1 і x'_2 – відповідно індуктивний опір розсіяння обмотки статора і індуктивний опір розсіяння обмотки ротора, що приведений до статора; x_m – індуктивний опір намагнічування двигуна; s – ковзання АД (пов'язане залежністю (3.3) зі швидкістю ω); \dot{I}_1 і \dot{I}'_2 – струм статора і приведений до статора струм ротору відповідно; \dot{I}_m – струм намагнічування.

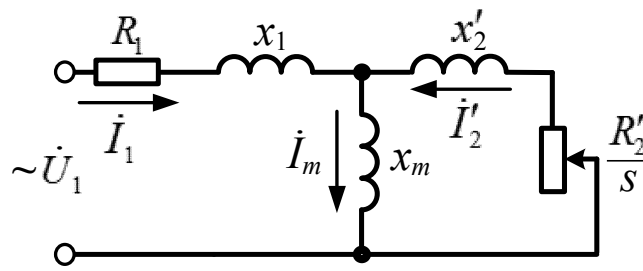


Рис.3.1 “Т”-образна схема заміщення асинхронного двигуна

Для асинхронного двигуна (як для будь-якої іншої електричної машини) характерні три основні режими роботи:

- холостий хід (при електромагнітному моменті M двигуна, рівним нулю);
- номінальний режим при номінальному електромагнітному моменті M_n і номінальному значенні швидкості ω_n (тобто – при номінальному значенні вихідної корисної потужності $P_{2n} = \omega_n M_n$ на валу двигуна);
- пусковий режим (при швидкості, що дорівнює нулю).

Згідно схеми заміщення на рис.3.1 в режимі холостого ходу статорний струм I_{1o} асинхронного двигуна розраховується із залежності:

$$I_{1o} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \quad (3.4)$$

і складає на практиці:

$$I_{1o} = (0,25 - 0,45) I_{1n}, \quad (3.5)$$

де I_{1n} – номінальне значення статорного струму електродвигуна. При цьому в режимі холостого ходу швидкість двигуна дорівнює синхронній ($\omega = \omega_o$), а ковзання, що розраховане з (3.2), дорівнює нулю ($s = 0$).

При номінальному режимі роботи АД його статорний струм дорівнює номінальному: $I_1 = I_{1n}$ і може бути розрахований зі схеми заміщення на рис.3.1 при номінальному значенні статорної напруги ($U_1 = U_{1n}$) і номінальному значенні ковзання s_n , яке розраховане з (3.2) при номінальному значенні швидкості ω_n у вигляді:

$$s_o = \frac{\omega_o - \omega_n}{\omega_o}. \quad (3.6)$$

Для більшості загально промислових АД номінальне ковзання складає (2-5)%.

В режимі початкового пуску асинхронного двигуна його швидкість дорівнює нулю, а ковзання, яке визначається з (3.2), дорівнює одиниці ($s = 1$). Після підстановки даного значення ковзання в параметри схеми заміщення на рис.3.1 отримаємо залежність для розрахунку пускового статорного струму $I_{1п}$ у вигляді:

$$I_{1\pi} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_\kappa^2 + x_\kappa^2}}, \quad (3.7)$$

де параметри:

$$R_\kappa = R_1 + R'_2, \quad (3.8)$$

$$x_\kappa = x_1 + x'_2 \quad (3.9)$$

називаються в теорії електричних машин відповідно активним і реактивним опорами короткого замикання асинхронної машини.

Звернемо увагу на те, що наближена спрощена залежність (3.7) для пускового статорного струму $I_{1\pi}$ АД була отримана за умови знехтування струмом намагнічування \dot{I}_m в схемі заміщення на рис.3.1 (оскільки для розглядуваного пускового режиму значення струму намагнічування набагато менше пускового роторного струму \dot{I}'_2).

Для загальнопромислових короткозамкнених АД пусковий статорний струм $I_{1\pi}$, який виникає при нерухомому роторі двигуна, дорівнює:

$$I_{1\pi} = (4 - 7)I_{1n}, \quad (3.10)$$

де I_{1n} – номінальний статорний струм електродвигуна. При цьому важливо звернути увагу на те, що зазначене підвищене (чотирьох – семикратне від номінального) значення пускового статорного струму двигуна, яке характерне при його прямому пуску від номінальної напруги живлячої мережі, цілком припустимо для асинхронних двигунів (на відміну, наприклад, від електродвигунів постійного струму). Тобто асинхронні двигуни розраховані на значення таких пускових статорних струмів, однак все ж таки при проектуванні і експлуатації електроприводів з АД слід враховувати збільшені втрати потужності, що виділяються, в їх статорних і роторних обмотках при прямих пусках і обмежувати (з метою запобігання теплового перегріву двигуна) кількість виконуваних їх пусків на годину.

З теорії електричних машин відома аналітична залежність електромагнітного моменту M асинхронного двигуна від значення s його ковзання, яка має вигляд:

$$M = \frac{3pU_1^2(R'_2/s)}{\omega_o[(R_1 + R'_2/s)^2 + x_\kappa^2]} = \frac{3pU_1^2(R'_2/s)}{2\pi f_1[(R_1 + R'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2]}, \quad (3.11)$$

де U_1 – діюча фазна статорна напруга, В;

ω_o – синхронна швидкість АД, що розраховується з (3.1), рад/с;

R_1 – активний опір статорної обмотки, Ом;

R'_2 – активний опір роторної обмотки, приведений до статору, Ом;

x_1 – реактивний опір розсіювання статорної обмотки, Ом;

x'_2 – реактивний опір розсіювання роторної обмотки, приведений до статору, Ом;

x_κ – реактивний опір короткого замикання АД, Ом;

f_1 – частота живлячої статорної напруги, Гц;

p – число пар полюсів статорної обмотки двигуна, в.о.

Графічна залежність природної механічної характеристики (СМХ) асинхронного двигуна, що відповідає її аналітичному виразу з (3.11), наведена на рис.3.2. На цьому рисунку по осі абсцис відкладений електромагнітний момент M двигуна, а по осі ординат: з лівої частини цієї осі – ковзання s двигуна, а з правої частини – швидкість ω ротора двигуна, яка розрахована із (3.3) через ковзання s .

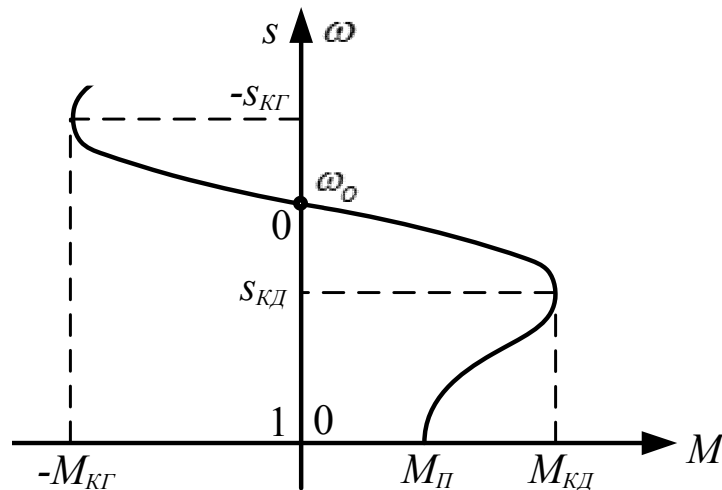


Рис.3.2 Природна статична механічна характеристика асинхронного двигуна

Аналіз СМХ асинхронного двигуна на рис.3.2 свідчить про те, що:

- 1) ця СМХ має нелінійний вид;
- 2) ця характеристика має дві точки екстремума за електромагнітним моментом, який розвиває двигун: в I квадранті механічної діаграми – зі значенням $M = +M_{КД}$ при ковзанні $s = s_{КД}$ для двигуневого режиму; в II квадранті – зі значенням $M = -M_{КГ}$ при ковзанні $s = s_{КГ}$ для генераторного режиму;
- 3) при пусковій швидкості ($\omega = 0$) електромагнітний момент двигуна дорівнює значенню пускового моменту $M_П$.

Значення ковзання $s_{КД}$ (або $s_{КГ}$) та електромагнітного моменту $M_{КД}$ (або $M_{КГ}$) в двигуневому (або генераторному) режимі називаються відповідно критичним ковзанням та критичним моментом асинхронного двигуна в зазначених режимах. Для знаходження значень $s_{КД}$ та $s_{КГ}$ критичного ковзання необхідно взяти похідну за змінною s від кінцевого виразу аналітичної залежності (3.11) та прирівнявши зазначену похідну до нуля.

Із розв'язання (відносно ковзання) отриманого алгебраїчного рівняння знайдемо аналітичну залежність для значення критичного ковзання:

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}, \quad (3.12)$$

де знак “+” відповідає значенню критичного ковзання s_{KD} в двигуневому режимі, а знак “–” – значенню критичного ковзання s_{KG} в генераторному режимі.

Підставивши значення критичних ковзань з (3.12) у вихідну аналітичну залежність (3.11), розрахуємо критичні (екстремальні) значення електромагнітного моменту АД:

$$M_K = \frac{3U_1^2 p}{(4\pi f_1) \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]}, \quad (3.13)$$

де знак “+” відповідає значенню критичного електромагнітного моменту M_{KD} в двигуневому режимі, а знак “–” – значенню критичного електромагнітного моменту M_{KG} в генераторному режимі.

Підставивши в залежність (3.11) значення ковзання $s=1$ (що відповідає зупиненому двигуну), отримаємо аналітичну залежність для знаходження пускового електромагнітного моменту M_{Π} асинхронного двигуна:

$$M_{\Pi} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 \left[(R_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}. \quad (3.14)$$

На практиці для більшості загальнопромислових асинхронних двигунів існують співвідношення для значень критичного

$$M_K = (1,8 - 2,2) M_H \quad (3.15)$$

та пускового

$$M_{\Pi} = (1,1 - 1,3) M_H \quad (3.16)$$

моментів, де M_H – номінальний момент електродвигуна.

З теорії електропривода також відомі спрощені (наближені) аналітичні залежності для визначення статичної механічної характеристики асинхронного двигуна, наприклад, у вигляді наведеної нижче формули Клоса:

$$M \approx \frac{2M_K}{s/s_K + s_K/s} \quad (3.17)$$

Причому, значення критичного ковзання s_K може також бути визначено зі спрощеної залежності:

$$s_K = s_H \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right), \quad (3.18)$$

де

$$\lambda_m = \frac{M_K}{M_H} - \quad (3.19)$$

перевантажувальна здатність асинхронного електродвигуна за моментом (задається в його паспортних даних);

M_H – номінальний момент електродвигуна;

s_H – значення номінального ковзання двигуна, що розраховується з формули (3.6).

З врахуванням формул (3.2) і (3.3) виконаємо аналіз можливих режимів роботи асинхронної машини, результати якого наведемо в табл.3.1.

Таблиця 3.1

Відповідність значень швидкості і ковзання різним режимам роботи асинхронної машини

№ п/п	Значення параметрів		Назва режиму асинхронної машини
	ω	s	
1	0	1	прямий пуск зупиненого двигуна
2	$0 < \omega < \omega_o$	$0 < s < 1$	двигуневий режим
3	ω_o	0	холостий хід
4	$\omega > \omega_o$	$s < 0$	генераторний режим
5	$\omega < 0$ (при $\omega_o > 0$)	$s > 1$	режим гальмування противвімкненням

При чому, для будь-якого із зазначених в табл.3.1 режимів роботи і для довільних значень швидкості ω асинхронної машини можливо (перейшовши за допомогою залежності (3.2) від швидкості ω до ковзання s) потім розрахувати з вихідної аналітичної залежності (3.11) та побудувати графічно відповідні цим режимам статичні механічні характеристики видів $s(M)$ та $\omega(M)$ для асинхронної машини.

Контрольні питання

1. Основні математичні залежності для короткозамкненого АД (аналітичні залежності для синхронної швидкості, ковзання, електромагнітного моменту, критичного та пускового моментів).
2. Схема заміщення короткозамкненого АД, назва її складових елементів.

3.3 Частотне керування короткозамкненим асинхронним двигуном

Блок-схема частотно-регульованого асинхронного електропривода наведена на рис.3.3, де ПЧ – перетворювач частоти; САК – система автоматичного керування. Пристрій, що формує трьохфазну напругу з регульованою амплітудою та частотою, називається перетворювачем частоти (ПЧ). Перетворювачі частоти поділяються на два види: електромашинні (створені на основі електричної синхронної машини) і статичні (створені на основі перетворювальної техніки, що не містять обертових механічних частин).

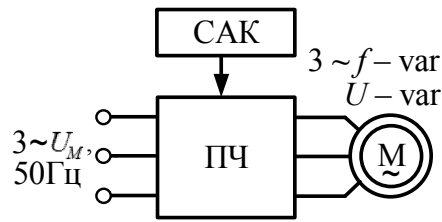


Рис.3.3 Блок-схема частотно-регульованого асинхронного ЕП.

В останні двадцять років найбільше застосування в електроприводі змінного струму знаходять статичні ПЧ, які створюються на основі IGBT-транзисторів, MOSFET транзисторів або тиристорів GTO IGCT, що запираються.

Можливість регулювання швидкості шляхом змінення частоти f_1 статорної напруги витікає із співвідношення (3.1)

Слід зазначити, що при частотному керуванні необхідно з зміненням частоти f_1 одночасно (взаємопов'язано) змінювати статорну напругу U_1 .

Існують наступні закони частотного керування:

1) пропорційний закон:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}, \quad (3.20)$$

де U_1 – діюче значення основної гармоніки фазної статорної напруги;

2) постійності потокозчеплення статора:

$$\frac{E_s}{f_1} \sim \Psi_s = \text{const}, \quad (3.21)$$

де E_s – діюче значення електрорушійної сили статорної обмотки;

Ψ_s – амплітудне значення фазного потокозчеплення статора;

3) постійність головного магнітного потоку в повітряному зазорі:

$$\frac{E_m}{f_1} \sim \Psi_m = \text{const}, \quad (3.22)$$

де E_m – діюче значення електрорушійної сили намагнічування;

Ψ_m – амплітудне значення головного магнітного потоку;

4) постійність потокозчеплення ротора:

$$\frac{E_r}{f_1} \sim \Psi_r = \text{const}, \quad (3.23)$$

де E_r – діюче значення електрорушійної сили роторної обмотки;

Ψ_r – амплітудне значення фазного потокозчеплення ротора;

5) економічний закон керування асинхронною машиною:

$$U_1 \sim f_1 \sqrt{M}, \quad (3.24)$$

запропонований академіком М.П. Костенко.

В залежностях (3.21)-(3.24) символ “ \sim ” позначає математичну операцію прямо пропорційної залежності.

Для розрахунку діючих фазних значень статорного I_1 та роторного I_2' струмів, електрорушійних сил статорної \dot{E}_s та роторної \dot{E}_r обмоток, електрорушійної сили намагнічування \dot{E}_m застосовується “Т”-образна схема заміщення частотно-керованого АД, що наведена на рис.3.4.

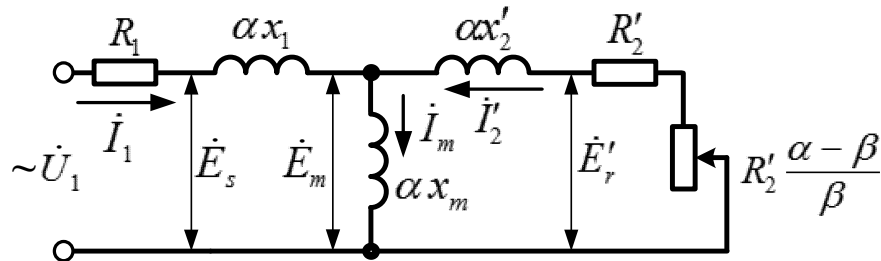


Рис.3.4 “Т”-образна еквівалентна схема заміщення частотно-керованого асинхронного двигуна

В цій схемі прийняті наступні позначення: \dot{U}_1 – діюче значення основної гармоніки фазної статорної напруги; R_1 і R_2' – відповідно активний опір статорної обмотки та активний опір роторної обмотки, приведений до статору; x_1 і x_2' – відповідно реактивний опір статорної обмотки та реактивний опір роторної обмотки, приведений до статору; x_m – реактивний опір намагнічування (причому значення згаданих реактивних опорів x_1 , x_2' та x_m відповідають паспортним даним асинхронного двигуна, які наведені для номінальної частоти $f_{1н}$, що дорівнює 50 Гц); \dot{I}_1 та \dot{I}_2' – діючі значення основної гармоніки фазних відповідно статорного струму та приведенного до статору струму ротору; \dot{I}_m – струм намагнічування; α , β – відповідно відносна частота та абсолютне ковзання частотно-керованого двигуна.

Відмітимо, що еквівалентна схема заміщення, що представлена на рис.3.4 відрізняється від розглянутої раніше схеми заміщення АД на рис.3.1 головним чином наявністю множників (у вигляді коефіцієнта α) перед значеннями згаданих раніше реактивних опорів x_1 , x_2' та x_m . Саме за допомогою цих множників враховуються фактичні змінення цих реактивних опорів в частотно-керованому АД при зміні частоти статорної напруги від його номінального значення $f_{1н}$.

При цьому відносна частота α та абсолютне ковзання β визначаються з наступних залежностей:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}, \quad (3.25)$$

$$\beta = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_{он}}. \quad (3.26)$$

В цих залежностях синхронна швидкість ω_O що відповідає новій (відмінній від номінальної) частоті f_1 статорної напруги живлення двигуна, розраховується у вигляді:

$$\omega_O = \frac{2\pi f_1}{p} = \alpha \omega_{O_n}, \quad (3.27)$$

де

$$\omega_{O_n} = \frac{2\pi f_{1n}}{p} - \quad (3.28)$$

номінальна синхронна швидкість АД, що обчислюється згідно (3.1) та відповідає номінальній частоті $f_{1n}=50$ Гц статорної напруги живлення двигуна (відповідно до його паспортних даних).

Взаємний зв'язок абсолютного β і відносного S ковзання частотно-керованого АД виражається наступними співвідношеннями:

$$s = \frac{\Delta\omega}{\omega_O} = \frac{\Delta\omega}{\alpha\omega_{O_n}} = \frac{\Delta\omega/\omega_{O_n}}{\alpha} = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (3.29)$$

Згідно (3.26) значення швидкості ω частотно-керованого двигуна визначається із залежностей:

$$\omega = \omega_O - \beta\omega_{O_n} = \omega_{O_n}(\alpha - \beta). \quad (3.30)$$

Як впливає з цих залежностей, можна розглядати швидкість даного двигуна у вигляді алгебраїчної різниці двох складових: першої – основної швидкості ω_O , що розраховується з (3.27), дорівнює швидкості холостого ходу (при електромагнітному моменті $M=0$) і залежить тільки від відносної частоти α при частотному керуванні, а також другої складової (що віднімається) – відхилення $\beta\omega_{O_n}$ за швидкістю, яка залежить від абсолютного ковзання β двигуна. Причому, абсолютне ковзання β на холостому ході двигуна (при $M=0$) дорівнює нулю і збільшується зі збільшенням електромагнітного моменту, що розвивається

За аналогією (як і в еквівалентній схемі заміщення на рис.3.4) для розрахунку статичних механічних характеристик $M(\alpha, \beta)$ частотно-керованого АД підставимо у раніше отриману залежність (3.11) для обчислення електромагнітного моменту АД значення реактивних опорів αx_1 та $\alpha x'_2$ (замість відповідно реактивних опорів x_1 та x'_2) і значення відносного ковзання s , виражене згідно (3.21) через коефіцієнти α та β . З врахуванням цього отримаємо кінцеву аналітичну залежність для знаходження електромагнітного моменту частотно-керованого АД у вигляді:

$$M = \frac{3pU_1^2(\alpha R'_2/\beta)}{\omega_O \left[(R_1 + \alpha R'_2/\beta)^2 + \alpha^2(x_1 + x'_2)^2 \right]}. \quad (3.31)$$

Аналогічно попереднім розмірковуванням (підстановкою значень реактивних опорів αx_1 та $\alpha x'_2$ відповідно замість x_1 та x'_2 , а також значення відносного ковзання $s=1$ при пуску) отримаємо з (3.13) та (3.14) аналітичні

залежності для розрахунку значень критичного моменту M_K та пускового моменту M_{Π} частотно-керованого АД у вигляді:

$$M_K = \frac{3U_1^2 p}{(4\pi\alpha f_{1H}) \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + \alpha^2 (x_1 + x_2')^2} \right]}, \quad (3.32)$$

$$M_{\Pi} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi\alpha f_{1H} \left[(R_1 + R_2')^2 + \alpha^2 (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (3.33)$$

Наведемо на рис.3.5 вид статичних механічних характеристик асинхронного двигуна для двох найбільш широко застосованих (зі згаданих відомих) законів частотного керування АД: для пропорційного закону (СМХ наведені пунктиром) та при постійності головного магнітного потоку в повітряному зазорі двигуна (показані точками).

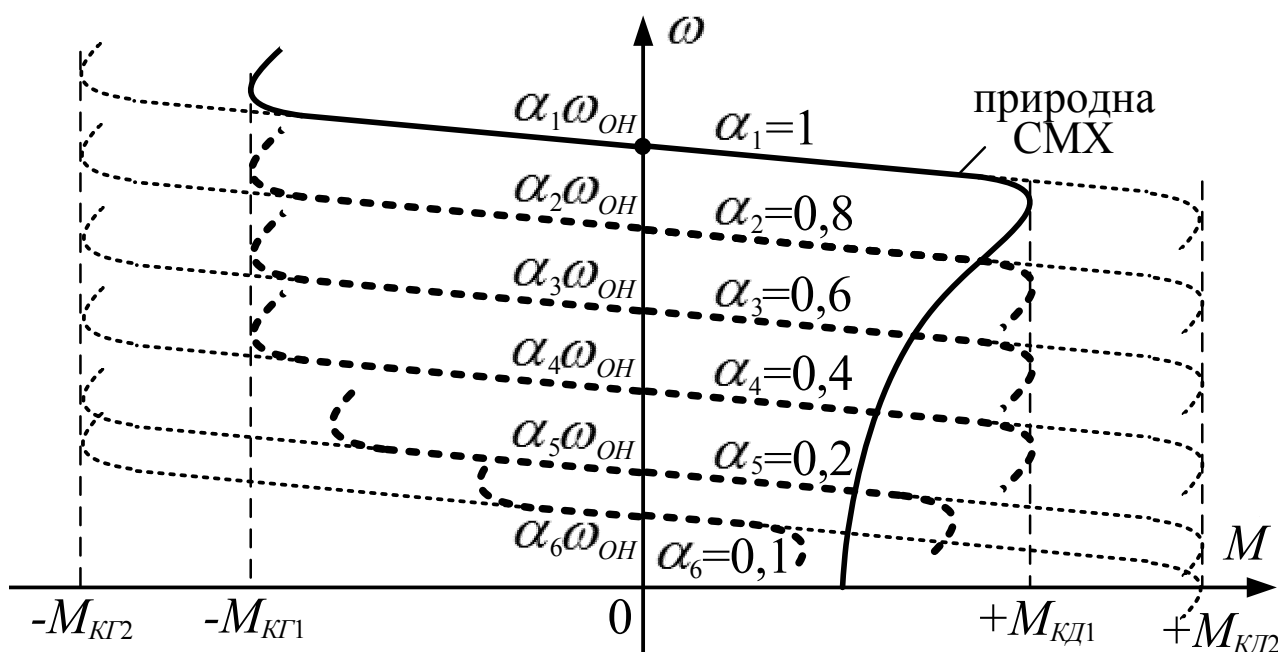


Рис.3.5 Статичні механічні характеристики частотно-керованого короткозамкненого АД (жирними лініями – для пропорційного закону керування; іншими – при постійності головного магнітного потоку)

Аналізуючи приведені на рис.3.5 СМХ, відмітимо для показаних законів частотного керування наступне:

1) при пропорційному законі частотного керування при частотах статорної напруги більше (0,3-0,4) від номінальної f_{1H} СХМ характеризуються значеннями критичних моментів M_{KD1} (для двигуневого режиму) та $M_{KГ1}$ (для генераторного режиму), рівними відповідним значенням моментів на природній статичній механічній характеристиці застосованого двигуна;

2) зі зменшенням частоти статорної напруги менше $(0,3-0,4) f_{1H}$ спостерігається зменшення значення критичних моментів двигуна – до $(0,2-0,4)$ від їх значення на природній характеристиці двигуна;

3) при законі частотного керування, що забезпечує постійність головного магнітного потоку в повітряному зазорі при всіх значеннях частоти статорної напруги критичні значення моментів M_{KD2} (для двигунового режиму) та M_{KG2} (для генераторного режиму) залишаються незмінними з величинами, що перевищують в $(1,3-1,5)$ рази відповідні критичні значення моментів на природній механічній характеристиці двигуна;

4) з врахуванням вище викладеного областю застосування пропорційного закону частотного керування є приводи з малими значеннями пускового статичного моменту (наприклад, вентилятори, насоси), а закону частотного керування при постійності головного магнітного потоку – приводи зі збільшеними значеннями пускового статичного моменту і високодинамічні приводи (з інтенсивними пускогальмівними режимами);

5) при обох розглянутих законах частотного керування асинхронний двигун працює тільки на пологій частині статичних механічних характеристик (не перевищуючи критичного ковзання), що зменшує втрати в роторі двигуна та забезпечує економічні енергетичні режими його роботи.

Контрольні питання

1. Частотне керування короткозамкненим АД (сутність, блок-схема частотно-керованого електропривода, аналітичні залежності для синхронної швидкості, ковзання, електромагнітного моменту, критичного та пускового моментів).

2. Схема заміщення короткозамкненого АД при частотному керуванні та її складові елементи.

3. Відомі способи частотного керування асинхронним двигуном, статичні механічні характеристики АД при найбільш розповсюджених способах частотного керування, області застосування різних способів частотного керування.

3.4 Фазове керування короткозамкненим асинхронним двигуном

Фазове керування отримало свою назву виходячи із того, що для регулювання амплітуди основної гармоніки статорної напруги використовується фазовий метод регулювання напруги (за рахунок фазового кута відкриття тиристорів α).

Фазове керування короткозамкненим АД створюється на основі тиристорних перетворювачів напруги (ТПН). Тиристорні перетворювачі напруги здійснюють регулювання амплітуди першої (основної) гармонічної

складової фазної статорної напруги асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Основні схеми трьохфазних тиристорних перетворювачів напруги для асинхронного електропривода (які в деякій технічній літературі називаються “тиристорними регуляторами напруги”) показані на рис.3.6 для: а – нереверсивного; б – реверсивного виконання. При цьому нереверсивний ТПН містить шість зустрічно паралельно підключених тиристорів V_1 і V'_1 , V_2 і V'_2 , V_3 і V'_3 та здійснюють обертання двигуна в одному напрямку, а реверсивний ТПН складається з десяти зустрічно паралельно підключених тиристорів V_1 і V'_1 , V_2 і V'_2 , V_3 і V'_3 , V_4 і V'_4 , V_5 і V'_5 та забезпечують обертання двигуна в двох напрямках (а також – при необхідності, режим його гальмування противвімкненням).

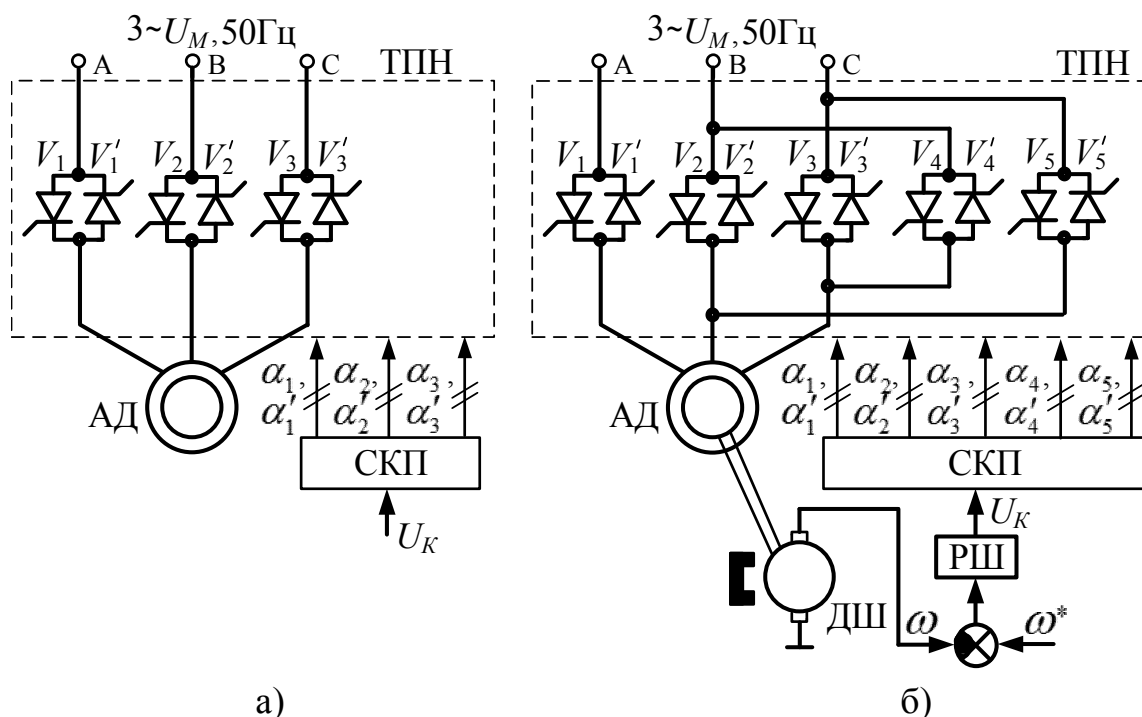


Рис.3.6 Схема асинхронного електропривода при фазовому керуванні з нереверсивним (а) та реверсивним (б) ТПН

Схема нереверсивного асинхронного ЕП з фазовим керуванням, що наведена на рис.3.6,а, додатково містить: систему керування перетворювачем СКП, яка на своєму виході формує сигнали керування цими тиристорами, що відповідають кутам їх відкриття α_1 і α'_1, α_2 і α'_2, α_3 і α'_3 . Ця схема відповідає розімкненій системі керування електропривода (без автоматичних регуляторів та зворотних зв'язків).

Схема реверсивного асинхронного ЕП з фазовим керуванням, що наведена на рис.3.6,б, виконана з замкнутою системою регулювання (регулятором швидкості РШ та давачем швидкості ДШ, що встановлено на валу асинхронного двигуна АД). В цій схемі електропривода імпульси керування (з заданими кутами їх відкриття α_1 і α'_1, α_2 і α'_2, α_3 і α'_3, α_4 і α'_4, α_5 і α'_5)

подаються шість тиристорів: V_1 і V_1' , V_2 і V_2' , V_3 і V_3' – для прямого напрямку обертання двигуна, або – на тиристори V_1 і V_1' , V_4 і V_4' , V_5 і V_5' – для зворотного напрямку обертання двигуна (оскільки в останньому випадку на статорні обмотки двигуна подається трифазна мережна напруга зі зворотнім чергуванням фаз).

Принцип роботи ТПН розглянемо на прикладі однієї фази з повним опором Z_H , електрична схема та часові діаграми якої, представлені на рис.3.7.

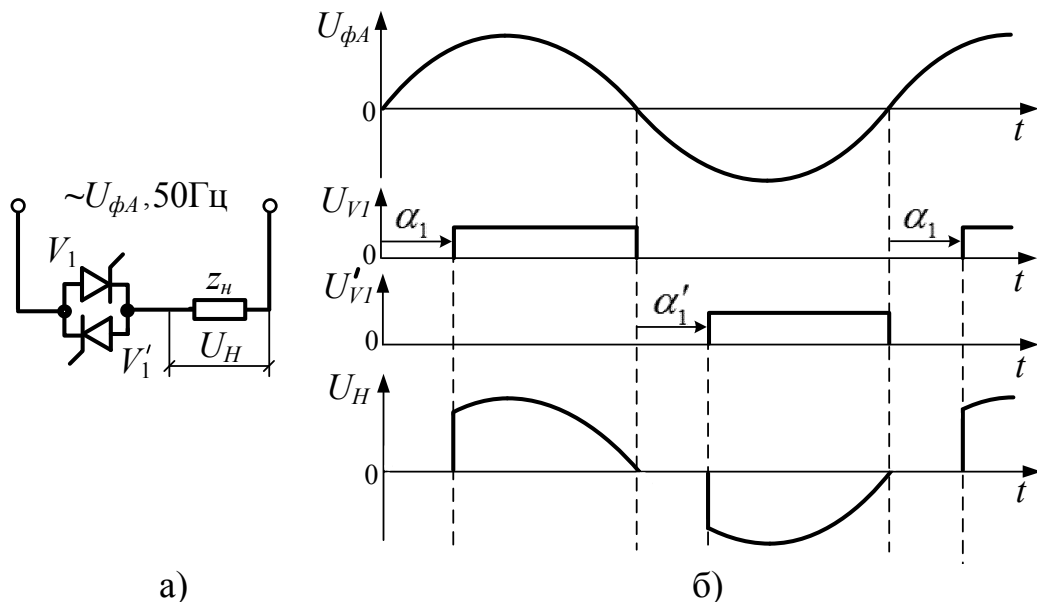


Рис.3.7 Електрична схема однієї фази ТПН (а) та відповідні їй часові діаграми роботи (б)

При додатній напівхвилі напруги живлення $U_{\phi A}$ і подачі напруги керування U_{v1} (в момент часу, що відповідає фазовому куту відкриття α_1 тиристора) на тиристор V_1 останній відкриється і на навантаженні Z_H з'явиться напруга U_H . При від'ємній напівхвилі напруги живлення $U_{\phi A}$ тиристор V_1 закриється, а тиристор V_1' в момент часу подачі на його керуючий вивід напруги керування U'_{v1} – відкриється. Зазначений момент часу подачі сигналу керування U'_{v1} відповідає фазовому куту відкриття тиристора α'_1 . При цьому на навантаженні з'явиться напруга U_H . Таким чином на виході ТПН на кожній фазі двигуна буде формуватися несинусоїдальної форми статорна напруга. Її відмінність від синусоїдальної форми буде залежати від фазових кутів відкриття тиристорів: чим меншими вони будуть, тим меншою буде відмінність від синусоїдальної форми і навпаки.

Відмітимо наступні особливості живлення АД статорною напругою несинусоїдальної форми:

1) середнє значення електромагнітного моменту, який розвивається двигуном, створюється основною (першою) гармонійною складовою статорної напруги (струму);

2) вищі гармоніки в фазних статорних напругах створюють вищі гармоніки (того ж порядку) в фазних статорних струмах, які визивають додатковий нагрів обмоток двигуна;

3) вищі гармонійні складові напруги (струму) створюють пульсуюче значення моменту (з середнім значенням, що дорівнює нулю);

4) таким чином, вплив на двигун вищих гармонійних складових напруги (струму) є негативним, оскільки збільшуються втрати в двигуні і пульсації швидкості; тому на практиці прагнуть зменшити амплітудні значення вищих гармонік статорної напруги (струму).

Розглянемо статичні механічні характеристики АД при фазовому керуванні

З врахуванням вище розглянутих особливостей живлення АД статорною напругою несинусоїдальної форми, розрахунок статичної механічної характеристики $M(s)$, критичного M_k та пускового M_{II} значення електромагнітного моменту асинхронного двигуна при фазовому керуванні можна здійснити відповідно з залежностей (3.11), (3.12) і (3.14), підставивши в них діюче значення \dot{U}_1 основної (першої) гармонійної складової статорної напруги двигуна.

При цьому знаходження згаданого діючого значення \dot{U}_1 основної (першої) гармонійної складової виконується шляхом розкладення періодичної функції несинусоїдальної форми $U_{1A}(t)$ в гармонійний ряд Фур'є. При фазовому керуванні також з раніше розглянутих аналітичних залежностей (3.1), (3.3), (3.2) і (3.12) визначаються (виходячи зі значення частоти f_1 основної гармонійної складової статорної напруги $U_{1A}(t)$, що дорівнює $f_{1H}=50\text{Гц}$) відповідно синхронна ω_o та фактична ω швидкості, фактичне s та критичне s_k ковзання асинхронного двигуна.

На рис.3.8 наведено вигляд розрахованих зі згаданих залежностей статичних механічних характеристик короткозамкненого АД при фазовому керуванні. На цьому рисунку біля кожної з кривих СМХ показані відповідні значення діючого значення основної гармоніки статорної напруги (в частках від номінального значення U_{1H}).

При цьому згідно кривих на рис.3.8 та залежності (3.12), по-перше, значення критичного ковзання s_k при фазовому керуванні АД залишається незмінним ($s_k = const$) і таким, що відповідає природній статичній механічній характеристиці двигуна (при $U_1 = U_{1H}$). По-друге, згідно (3.13) зі зменшенням діючого значення U_1 основної гармоніки фазної статорної напруги двигуна значення критичного моменту M_k зменшується прямо пропорційно від квадрату зазначеної напруги:

$$M_k \sim U_1^2. \quad (3.34)$$

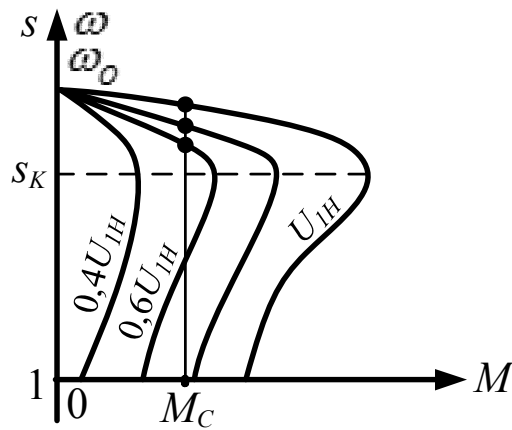


Рис.3.8 Статичні механічні характеристики короткозамкненого АД при фазовому керуванні

Вагомими перевагами фазового керування є його простота і дешевизна тиристорного перетворювача напруги та системи автоматичного керування асинхронним електроприводом.

Недоліками фазового керування короткозамкненого АД є наступне:

1) дуже малий діапазон регулювання швидкості ($S_K > S > 0$), при якому здійснюється робота з малими втратами потужності; тільки при даних високих швидкостях АД може стійко працювати при розімкнутій САК;

2) при швидкостях, що відповідають ковзанням $S > S_K$, робота двигуна відбувається при великих ковзаннях, а отже, – зі збільшеними втратами потужності в роторі; причому в даному діапазоні швидкостей стійка робота можлива тільки в замкнутій за швидкістю САК (з регулятором швидкості РШ);

3) приймаючи до уваги попереднє, для роботи з заданим моментом навантаження в діапазоні ковзань $S > S_K$ обирають двигун в (2-3) рази більшим за потужністю (ніж потрібно для створення моменту навантаження M_n); це забезпечує роботу АД без перегріву, але потребується значно більші потужність, габарити та вартість двигуна, який використовується;

4) можна уникнути збільшення потужності двигуна, якщо застосувати АД з фазним ротором, в якому основні втрати потужності будуть виділятися не в двигуні, а в додаткових резисторах, ввімкнених в ланцюг ротору; очевидно, при цьому змінюються статичні механічні характеристики (які стають схожими на СМХ для АД з фазним ротором при введенні в ланцюг ротору додаткових резисторів, що буде розглянуто в п. 3.6).

Область застосування фазового керування короткозамкненим АД розповсюджується на механізми:

- з рідкісним часом включення в сутки та невеликим значенням статичного моменту при пуску (наприклад, насоси, вентилятори);

- для плавного пуску (або гальмування) АД середньої і великої потужності (щоб зменшити кидки пускового моменту і пускового струму двигуна, подовжити термін служби потужних двигунів, у яких механічна міцність знижується із-за ударів пускового моменту).

Контрольні питання

1. Асинхронний електропривод з фазовим керуванням (блок-схема електропривода, електрична схема реверсивного та нереверсивного ТПН, принцип регулювання швидкості).

2. Розрахункове співвідношення для електромагнітного моменту, критичного моменту та критичного ковзання, відповідні статичні механічні характеристики короткозамкненого АД при фазовому керуванні, переваги та недоліки, область застосування.

3.5 Релейно-контакторне керування короткозамкненим асинхронним двигуном

3.5.1 Пуск короткозамкненого АД

Для керування АД промисловість випускає стандартні шафи керування, до складу яких входять: контактор або магнітний пускач, теплові реле, вимикач, кнопки керування (“Пуск” і “Стоп”). Зазначені шафи керування здійснюють прямий пуск асинхронного двигуна, під яким розуміється підключення його статорних обмоток безпосередньо до електричної мережі живлення.

На рис.3.9 наведений приклад нереверсивної релейно-контакторної схеми пуску короткозамкненого АД, в якій використанні наступні умовні позначення: Q – автоматичний вимикач (містить максимальний захист-розчіплювач); КЛ – лінійний контактор; РТ1 і РТ2 – теплові реле; КнП і КнС – кнопки “Пуск” і “Стоп”.

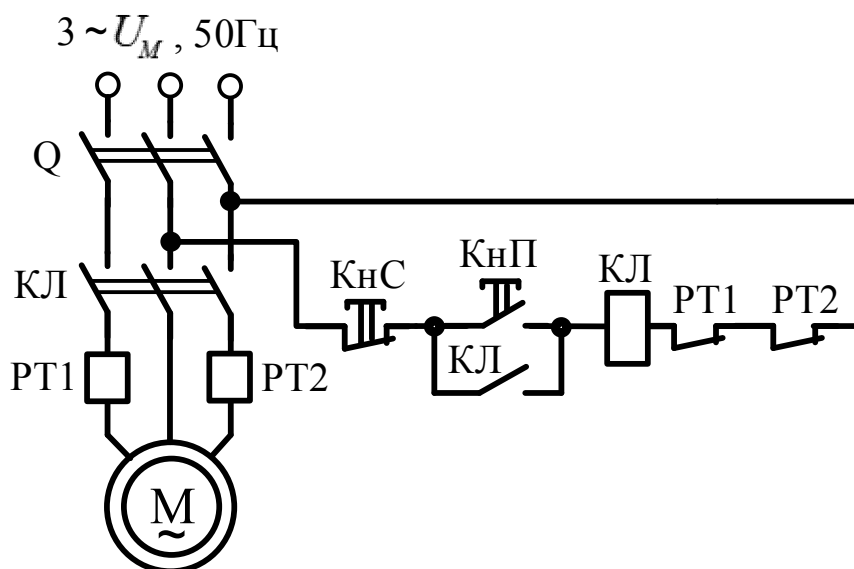


Рис.3.9 Релейно-контакторна нереверсивна схема пуску
короткозамкненого АД

Розглянемо функціонування схеми на рис.3.9. При замиканні автоматичного вимикача Q на схему керування подається електрична напруга. Після натискання кнопки КнП “Пуск” втягується лінійний контактор КЛ та через свій контакт КЛ (підключений паралельно контакту кнопки КнП) стане на самопідхват. Одночасно з цим замкнуться також силові контакти КЛ, через які трифазна електрична напруга потрапляє на фазні статорні обмотки двигуна. Після цього почнеться режим прямого пуску двигуна від мережі живлення і подальший вихід двигуна на природну статичну механічну характеристику (зі значенням швидкості, близьким до номінального).

Зупинка двигуна здійснюється при натисканні кнопки КнС “Стоп”, після чого знеструмлюється котушка контактора КЛ, розмикаються його силові контакти, статорні обмотки двигуна відключаються від електричної мережі живлення та двигун гальмується на “вибігу” (під впливом статичного моменту опору M_c привода).

Теплові реле РТ1 і РТ2 забезпечують захист двигуна від струмів перевантаження, а вимикач Q – від струмів короткого замикання. Слід відмітити, що автоматичний вимикач також може бути обладнаний тепловим розчіплювачем та забезпечувати одночасний захист як від струмів короткого замикання, так і від струмів перевантаження.

Статична механічна характеристика $M(\omega)$ та часові діаграми швидкості $\omega(t)$, електромагнітного моменту $M(t)$ і діючого значення фазного статорного струму $I_1(t)$ короткозамкненого АД при його прямому пуску (в схемі на рис.3.9), показані на рис.3.10, де ω_{cm} , M_c та I_{1c} – сталі значення відповідно швидкості, статичного моменту та статорного струму двигуна після закінчення пуску. Згідно (3.10) пускові значення статорного струму короткозамкненого АД при прямому пуску від трифазної електричної мережі складає (4-7) – кратні значення від номінального струму I_{1n} двигуна.

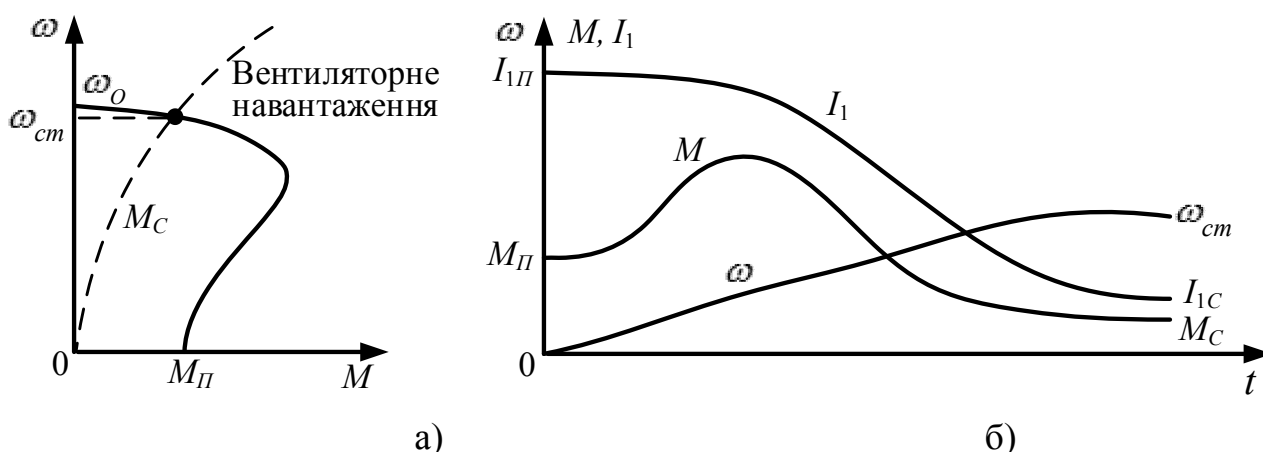


Рис.3.10 Статична механічна характеристика (а) та часові діаграми (б) швидкості $\omega(t)$, електромагнітного моменту $M(t)$ і діючого значення фазного статорного струму $I_1(t)$ короткозамкненого АД при прямому пуску

3.5.2 Реверс короткозамкненого АД

З теорії електричних машин відомо, що для реверсу швидкості трифазного асинхронного двигуна потрібно змінити, як наведено на рис.3.11, чергування фаз статорної напруги з прямого (згідно рис.3.11,а) на зворотне (згідно рис.3.11,б) або навпаки, зі зворотного – на пряме.

Прямому чергуванню фазних статорних напруг $\dot{U}_{1A}, \dot{U}_{1B}, \dot{U}_{1C}$ відповідають їх фазові аргументи, які дорівнюють: $0^\circ, -120^\circ, +120^\circ$. Зворотному чергуванню фазних напруг $\dot{U}_{1A}, \dot{U}_{1B}, \dot{U}_{1C}$ відповідають їх фазові аргументи: $0^\circ, +120^\circ, -120^\circ$. При цьому прямому чергуванню фаз статорних напруг АД відповідають напрямки обертання магнітного потоку та швидкості ротора двигуна проти годинникової стрілки, а зворотному чергуванню фаз – навпаки, за годинниковою стрілкою.

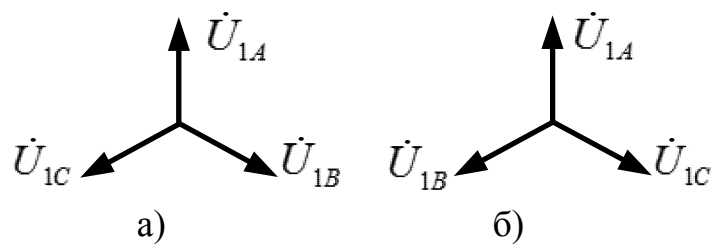


Рис.3.11 Векторні діаграми фазних статорних напруг (а – при прямому; б – при зворотному чергуванні фаз)

Реверсивна релейно-контакторна схема пуску короткозамкненого АД наведена на рис. 3.12 і вона містить наступні умовні позначення: КЛВ і КЛН: лінійні контактори “Вперед” і “Назад”; КнВ і КнН – кнопки “Пуск” для напрямків руху “Вперед” і “Назад” відповідно; РТ1 і РТ2 – теплові реле; Q – автоматичний вимикач; КнС – кнопка “Стоп”; ПП – передавальний пристрій; Б – барабан. В схемі на рис.3.12 застосовані кнопки керування КнВ і КнН, що містять механічно пов’язані здвоєні (нормально-відкриті і нормально-замкнуті) контакти, що показані на рис.3.13.

Схема керування на рис.3.12 функціонує наступним чином. Включенням автоматичного вимикача Q подається напруга на схему керування. В залежності від потрібного напрямку руху вантажу (вгору або вниз) натискається кнопка КнВ або КнН, при цьому відповідно включаються контактори КЛВ або КЛН і стають на самопідхват. Через силові контакти одного із зазначених контакторів напруга потрапляє до двигуна і починається режим розгону і вихід двигуна на природну СМХ. Розглядувані контактори КЛВ і КЛН мають по одному нормально-замкненому контакту, які включаються послідовно з котушкою контактора, що забезпечує протилежний напрямок обертання: контакт КЛВ підключається послідовно з котушкою КЛН, а нормально-замкнений контакт КЛН – послідовно з котушкою КЛВ. Таким чином виключається можливість одночасного вмикання обох контакторів (для запобігання виникнення коротких замикань).

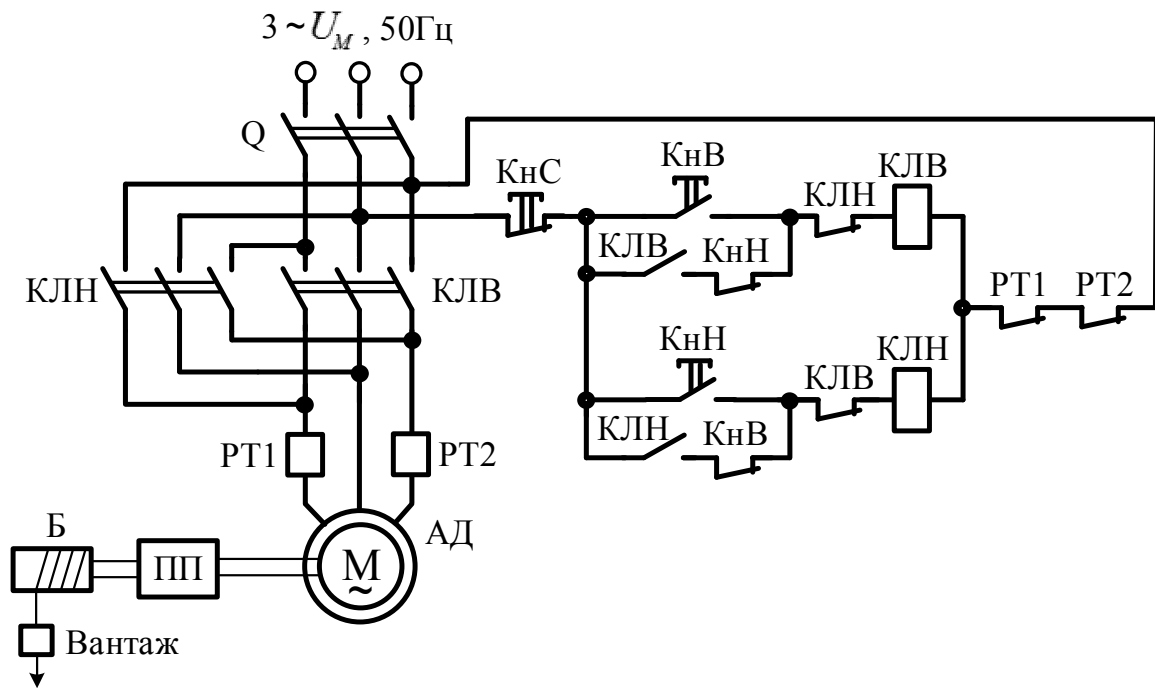


Рис.3.12 Релейно-контакторна реверсивна схема керування АД

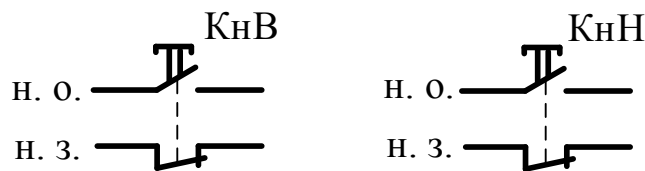


Рис.3.13 Схеми кнопок керування КНВ і КНН, кожна з яких обладнана нормально-відкритим (н.в.) і нормально-замкненим (н.з.) контактами

Розглянемо роботу схеми при реверсі двигуна. Нехай був ввімкнений контактор КЛВ, що відповідало режиму підйому вантажу. Для спуску вантажу треба натиснути кнопку КНН. При цьому знеструмиться через розімкнутий нормально-замкнений контакт цієї кнопки котушка контактора КЛВ. Силкові контакти контактора КЛВ розімкнуться і двигун знеструмиться, одночасно з цим замкнеться блокувальний контакт КЛВ в ланцюгу котушки контактора КЛН і він включиться. Контактор КЛН стане на самопідхват, а через його замкнені силкові контакти до двигуна буде прикладена трифазна напруга із зміненим чергуванням фаз. Двигун спочатку буде гальмуватися до нульової швидкості, а потім почне розганятися в зворотньому напрямку. Вантаж почне спускатися.

СМХ асинхронного двигуна при використанні розглядуваної релейно-контакторної схеми керування наведені на рис.3.14. В I-ому квадранті механічної діаграми привод працює в режимі розгону (годограф 1-2) та в сталому двигуновому режимі (точка 2) на природній механічній характеристиці. В II-ому квадранті механічної діаграми на рис.3.14 відбувається режим гальмування з противвімкненням (ГПВ). Зазначимо, що гальмування противвімкненням – це такий режим гальмування АД, при якому статор відключається від трьохфазної мережної напруги з одним чергуванням

фаз і підключається до трьохфазної мережної напруги з іншим чергуванням фаз. При цьому характерна особливість режиму ГПВ полягає у тому, що в даному режимі магнітний потік, створюваний статорними обмотками двигуна, обертається в одному напрямку, а ротор двигуна – в протилежному.

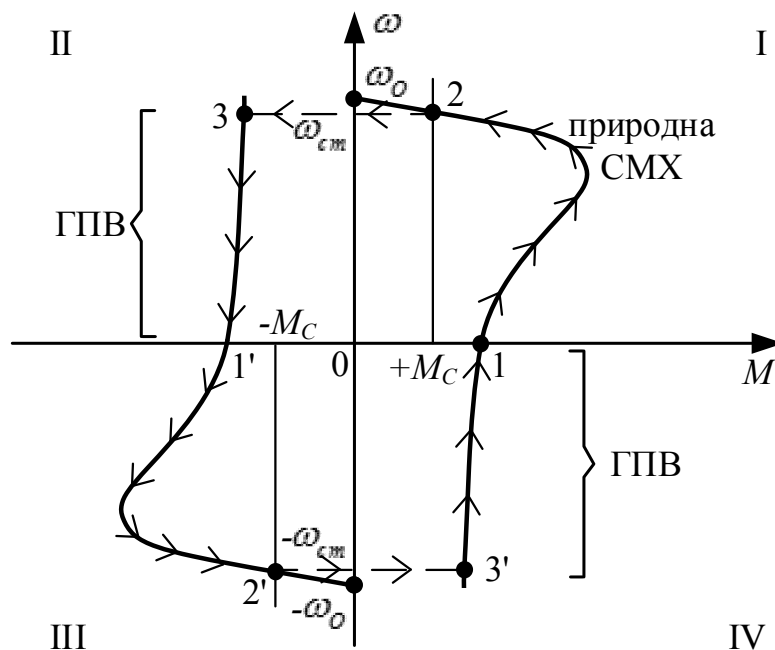


Рис.3.14 Статичні механічні характеристики короткозамкнутого АД в режимі реверсу швидкості

З врахуванням останнього ділянка 3-1' на СМХ асинхронного двигуна, яка відповідає режиму ГПВ на рис.3.14, розраховується з аналітичної залежності (3.11) для від'ємного значення синхронної швидкості ($-\omega_o = -2\pi f_{1n}/p$) в діапазоні зміни ковзання s двигуна від 2 до 1. Після зменшення швидкості двигуна до нуля (точка 1') починається в III -ому квадранті механічної діаграми розгін АД (по ділянці 1' - 2' СМХ) до від'ємного значення сталої швидкості $-\omega_{cm}$.

В IV квадранті електропривод переходить в режим гальмування противвмкненням (ГПВ), якому відповідає ділянка 3'-1 СМХ на рис.3.14. Значення гальмівного електромагнітного моменту в даному режимі розраховується з аналітичної залежності (3.11) для додатного значення синхронної швидкості ($\omega_o = 2\pi f_{1n}/p$) в діапазоні зміни ковзання s двигуна від 2 до 1. Після досягнення швидкістю нульового значення (точка 1) відбувається в I -ому квадранті механічної діаграми розгін АД (по ділянці 1- 2 СМХ) до додатного значення сталої швидкості ω_{cm} .

Недоліками гальмування противвмкненням являються:

– неекономічність (великі втрати потужності в двигуні), оскільки робота відбувається при великих значеннях ковзання ($S > 1$);

– збільшенні (в 5-7 раз від номінального значення) статорні струми двигуна.

Область застосування релейно-контакторної реверсивної (з ГПВ) схеми керування – це електроприводи з відносно рідкими у часі режимами реверсу, коли основний час АД працює в сталих режимах (“Вперед” або “Назад”), наприклад – підйомно-транспортні механізми (крани).

3.5.3 Динамічне гальмування короткозамкненого АД

Динамічне гальмування асинхронного двигуна – це такий режим гальмування, при якому статорні обмотки АД відключаються від трифазної мережі і після цього у дві з них подається постійний струм.

Схема керування, що забезпечує динамічне гальмування АД, представлена на рис. 3.15 і вона містить наступні умовні позначення: Q – автоматичний вимикач; КЛ – лінійний контактор; КГ – контактор гальмування; В – випрямляч; R_r – резистор гальмування; РТ1, РТ2 – теплові реле; РЧ – реле часу; КнС – кнопка “Стоп”; КнП – кнопка “Пуск”.

У вихідному стані схеми (після включення автоматичного вимикача Q) котушки контакторів КЛ та КГ, а також реле РЧ знеструмлені, їх нормально-відкриті контакти розімкнені, двигун відключений від трифазної мережі і знаходиться в зупиненому стані. Після натискання кнопки КнП “Пуск” включається лінійний контактор КЛ і становиться на само підхоплення, його силові н.в. контакти замикаються, на статорні обмотки АД подається трифазна змінна напруга, відбувається прямий пуск цього двигуна до сталого значення швидкості. При цьому за допомогою н.з. контакту КЛ, що розмикається, котушка контактора гальмування КГ залишається знеструмленою, замикається н.в. контакт КЛ і подає напругу з виходу випрямляча В на котушку реле часу РЧ, це реле включається і замикається його н.в. контакт.

Розглянемо роботу схеми в режимі динамічного гальмування. Після натискання кнопки КнС знеструмлюються контактор КЛ та через його розмикаючийся н.в. контакти знеструмлюються статорні обмотки АД і котушка реле РЧ. При цьому контакт реле РЧ в ланцюзі котушки контактора КГ залишається замкненим (оскільки має витримку часу на відключення). Таким чином після відключення КЛ включиться контактор КГ і через його н.в. контакт, що замикається, до двох фаз двигуна буде прикладена постійна напруга, що формується на виході випрямляча В. Двигун переходить до режиму динамічного гальмування. Обмеження значення постійного струму I_d при динамічному гальмуванні здійснюється за допомогою регульованого резистора R_r . Тривалість динамічного гальмування визначається налаштованою витримкою часу на відключення реле РЧ. Після того, як швидкість двигуна при гальмуванні стане рівною нулю зазначена витримка часу закінчиться, н.в. контакт знеструмленого реле РЧ розімкнеться, відключиться контактор КГ динамічного гальмування, знеструмляться статорні обмотки зупиненого двигуна.

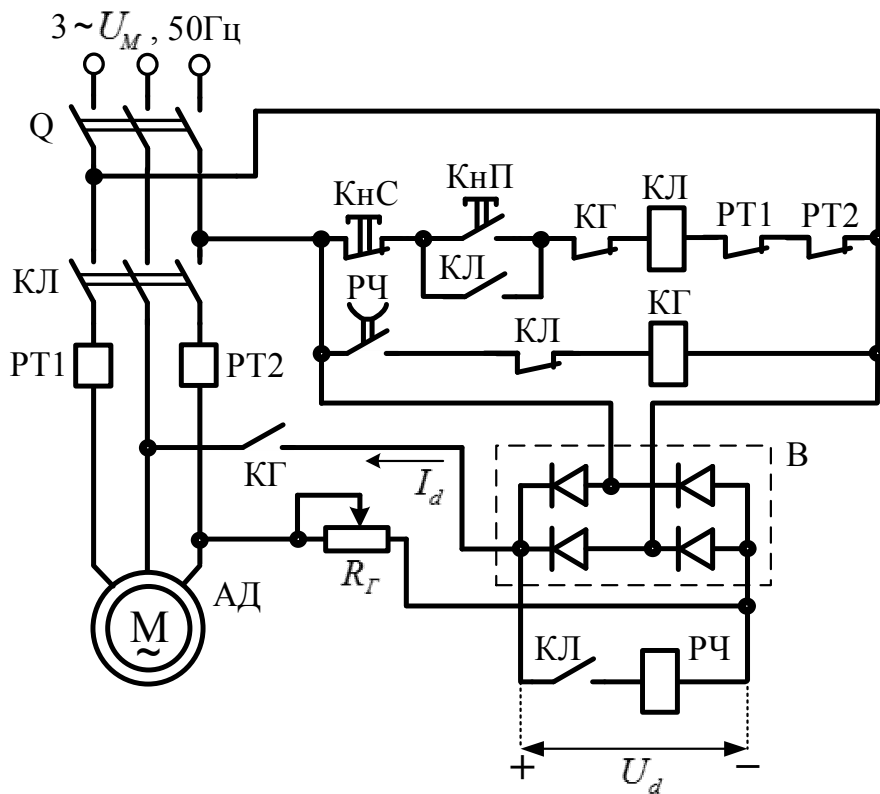


Рис.3.15. Релейно-контакторна неререверсивна схема керування АД, що забезпечує динамічне гальмування двигуна

Графічний вид статичних механічних характеристик АД, які реалізуються в релейно-контакторній схемі на рис.3.15, показані на рис. 3.16, де в I квадранті механічної діаграми годограф 1-2 відповідає прямому пуску АД, а у II квадранті годограф 2-3-4-0 – відповідає режиму динамічного гальмування (зі струмом I_{d1}). Крім того, у II квадранті показані годографи 2-3'-4'-0 та 2-3''-4''-0, які відповідають режиму динамічного гальмування АД з меншими значеннями струму I_{d2} та I_{d3} (де $I_{d1} > I_{d2} > I_{d3}$).

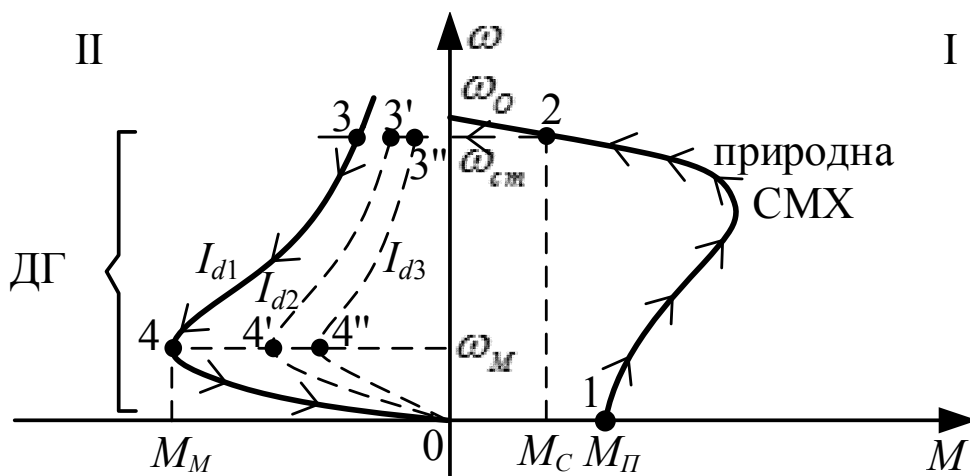


Рис.3.16 Статичні механічні характеристики АД для релейно-контакторної неререверсивної схеми керування з динамічним гальмуванням

Статичні механічні характеристики АД в режимі динамічного гальмування описуються залежностями:

$$M = -\frac{3pI_{\text{екв}}^2 x_m^2 (R'_2/s)}{2\pi f_1 [(R'_2/s)^2 + (x_m + x'_2)^2]}, \quad (3.35)$$

де

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{2/3} I_d - \quad (3.36)$$

еквівалентний струм в режимі ДГ;

$$S = \frac{\omega}{\omega_0} - \quad (3.37)$$

еквівалентне ковзання в режимі ДГ;

ω та ω_0 – відповідно фактична швидкість в режимі ДГ і синхронна швидкість двигуна (при живленні від трифазної мережі);

p та f_1 – відповідно кількість пар полюсів АД і частота напруги трифазної мережі живлення;

R'_2 , x'_2 та x_m – параметри схеми заміщення двигуна (відповідно активний та реактивний опори ротора, що приведені до статора; реактивний опір намагнічування).

При цьому максимальне значення M_M електромагнітного моменту двигуна при динамічному гальмуванні і відповідне йому ковзання s_M знаходяться із залежностей:

$$M_M = -\frac{3I_{\text{екв}}^2 x_m^2 p}{2(2\pi f_1)(x_m + x'_2)}, \quad (3.38)$$

$$s_M = \frac{R'_2}{x_m + x'_2} = \frac{\omega_M}{\omega_0}. \quad (3.39)$$

Можливий розрахунок СМХ асинхронного двигуна в режимі ДГ зі спрощеної наближеної залежності:

$$M \approx \frac{2M_M}{s/s_M + s_M/s}. \quad (3.40)$$

З аналізу аналітичних і графічних залежностей для СМХ асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування випливає:

1) режим ДГ здійснюється в II та IV квадрантах механічної діаграми привода (в залежності від напрямку обертання двигуна); при цьому при значенні швидкості, рівної нулю, гальмівний момент АД при динамічному гальмуванні також дорівнює нулю;

2) без додатних опорів в роторі (введення яких можливо тільки в АД з фазним ротором) значення гальмівного моменту АД при динамічному гальмуванні, як показано на рис. 3.16, мале на великих швидкостях: $\omega > 3\omega_M$ і, навпаки, збільшується в області малих швидкостей: $\omega \approx \omega_M$;

3) зі збільшенням значення постійного струму I_d гальмівний момент збільшується (в квадраті від I_d), але тільки до тих пір, поки не відбувається насичення магнітного ланцюга АД; після цього гальмівний момент практично не збільшується;

4) при динамічному гальмуванні кінетична енергія привода перетворюється в електричну і розсіюється у вигляді теплової енергії в гальмівному резисторі R_r та статорних обмотках двигуна.

Область застосування динамічного гальмування розповсюджується на асинхронні електроприводи, в яких режими гальмування нечасті (оскільки розглядуваний вид гальмування неекономічний) і недостатньо (за вимогами технології або охорони праці) застосування гальмування на “вибігу” (шляхом відключення статорних обмоток від мережі), оскільки потребується більш ефективний режим гальмування (для скорочення його тривалості).

Контрольні питання

1. Релейно-контакторна нереверсивна схема керування в короткозамкненому АД (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якінного струму двигуна, максимально допустимі значення якінного струму та електромагнітного моменту). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

2. Релейно-контакторна реверсивна схема керування в короткозамкненому АД (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якінного струму двигуна, максимально допустимі значення якінного струму та електромагнітного моменту). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

3. Режим противімкнення асинхронного двигуна (сутність, розрахунок та побудова СМХ для даного режиму, пускові значення статорного струму та електромагнітного моменту, переваги та недоліки, область застосування).

4. Динамічне гальмування короткозамкненого асинхронного двигуна (сутність, розрахунок та побудова СМХ для даного режиму, пускові значення статорного струму та електромагнітного моменту, переваги та недоліки, область застосування).

5. Релейно-контакторна нереверсивна схема керування АД, що забезпечує динамічне гальмування двигуна (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та

якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

3.6 Керування асинхронним двигуном з фазним ротором

3.6.1 Основні залежності для побудови статичних механічних характеристик для АД з фазним ротором

Розрахувати штучні СМХ для АД з фазним ротором при введенні додаткових резисторів $R_{\partial\partial\partial}$ в трифазний ланцюг ротору можна аналогічно (3.11) з наступної залежності:

$$M = \frac{3pU_1^2[(R'_2 + R'_{\partial\partial\partial})/s]}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2 + R'_{\partial\partial\partial}}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}, \quad (3.41)$$

де U_1 та f_1 – відповідно діюче значення та частота фазної статорної напруги двигуна;

s та p – відповідно ковзання і число пар полюсів АД;

R_1 , R'_2 , x_1 та x'_2 – параметри схеми заміщення АД;

$$R'_{\partial\partial\partial} = \left(\frac{w_1 k_{\partial\partial 1}}{w_2 k_{\partial\partial 2}} \right)^2 \cdot R_{\partial\partial\partial} - \quad (3.42)$$

приведене до статору значення опору додаткового резистора $R_{\partial\partial\partial}$;

w_1 та w_2 – кількість витків статорної і роторної фазних обмоток відповідно;

$k_{\partial\partial 1}$ та $k_{\partial\partial 2}$ – обмоточні коефіцієнти для статорної і роторної обмоток відповідно.

Розраховані з (3.41) статичні механічні характеристики АД з фазним ротором, в ланцюг якого введені додаткові резистори $R_{\partial\partial\partial}$, приведені на рис.3.17. На цьому рисунку кривою 9-7 показана природна СМХ двигуна, а кривими 9-1, 9-3 та 9-5 – штучні СМХ, що відповідають введенню в ланцюг ротору додаткових резисторів $R_{\partial\partial\partial 1}$, $R_{\partial\partial\partial 2}$ та $R_{\partial\partial\partial 3}$ (де $R_{\partial\partial\partial 1} > R_{\partial\partial\partial 2} > R_{\partial\partial\partial 3}$).

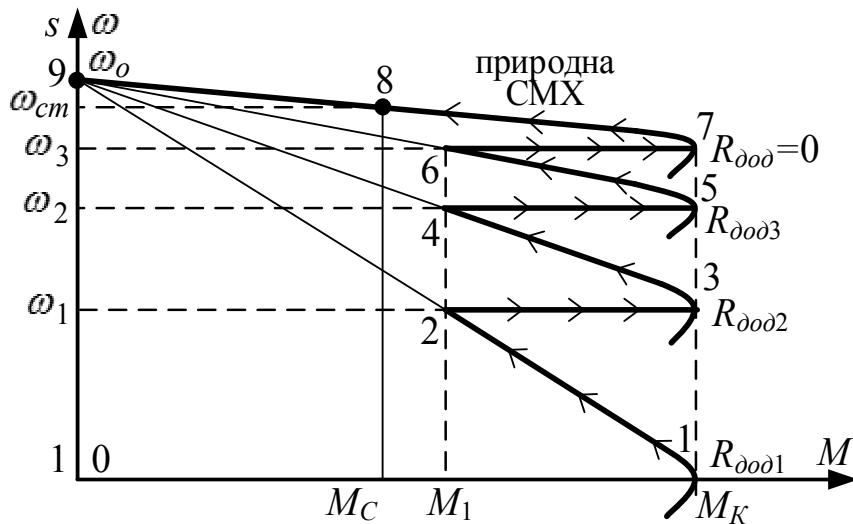


Рис.3.17 Статичні механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором, в ланцюг якого введені додаткові резистори

При цьому для природної та побудованих на рис.3.17 штучних СМХ визначається максимальне (критичне) значення електромагнітного моменту M_K двигуна зі співвідношення (3.13), якому відповідає критичне ковзання s_K , розраховане з формули:

$$s_K = \pm \frac{R'_2 + R'_{\delta\delta\delta}}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \quad (3.43)$$

Згадана (3.13) та отримана (3.43) залежності свідчать про наступне:

- значення критичного моменту M_K АД не залежить від опору R'_2 (а також від додаткового введенного в ланцюг ротора опору $R_{\delta\delta\delta}$), і дорівнює M_K природної СМХ;
- критичне ковзання s_K прямо пропорційно залежить від сумарного опору в ланцюзі ротору, яке дорівнює $(R'_2 + R'_{\delta\delta\delta})$.

3.6.2 Спосіб керування пуском АД з фазним ротором з вмиканням додаткових резисторів в обмотки ротора

Керування за ланцюгом ротора (тобто введенням додаткових резисторів використовується для збільшення середнього значення пускового моменту двигуна при розгоні, що дозволяє здійснити запуск з великим значенням (більше пускового моменту M_{Π}) статичного моменту M_c механізму.

Для даного керування відповідають раніше отримані співвідношення в яких у якості опору R'_2 ротору слід підставляти сумарний опір у роторі, який складається із послідовно підключених додаткових резисторів і власного опору обмотки ротору.

Силовa схема електропривода на основі АД з фазним ротором і додатковими резисторами, що представлена на рис. 3.18, містить: автоматичний вимикач Q та прискорюючі контактори КП1, КП2, КП3, нормально-відкриті

силові контакти яких по мірі розгону двигуна шунтують частину додаткових резисторів в роторі, зменшуючи опір відповідно від $R_{\text{доод1}}$ до $R_{\text{доод2}}$; від $R_{\text{доод2}}$ до $R_{\text{доод3}}$; від $R_{\text{доод3}}$ до нуля. Повна релейно-контакторна схема керування пуском для АД з фазним ротором будується аналогічно схемі релейно-контакторного керування пуском ДПС незалежного збудження у функції часу (яка була розглянута раніше у п.2.7.3).

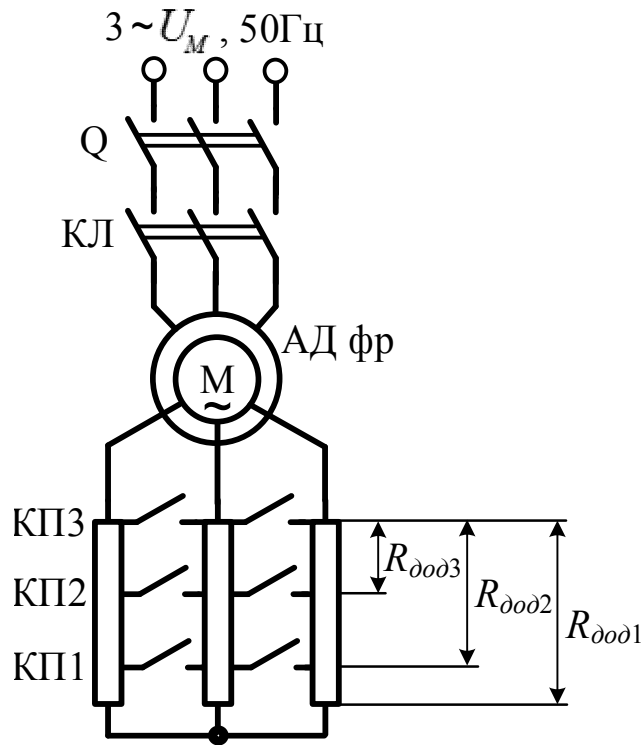


Рис.3.18 АД з фазним ротором та введеними додатковими резисторами в ланцюг ротора

На рис. 3.17 показаний годограф зміни швидкості ω та електромагнітного моменту M асинхронного двигуна з фазним ротором при пуску (до сталої швидкості $\omega_{\text{ст}}$), який відповідає ступінчастій зміні додаткового резистору в ланцюгу ротору (згідно релейно-контакторній схемі керування на рис.3.18). Даний годограф представляє ломану криву 1-8, що складена з ділянок: 1-2 (з додатковим резистором $R_{\text{доод1}}$); 2-3-4 (з додатковим резистором $R_{\text{доод2}}$); 4-5-6 (з додатковим резистором $R_{\text{доод3}}$); 7-8 (на природній СМХ двигуна).

Звернемо увагу на те, що зі збільшенням кількості ступенів додаткового резистора $R_{\text{доод}}$ збільшується мінімальне (M_1 на рис.3.17) та середнє значення пускового моменту АД з фазним ротором (на практиці звичайно застосовуються від двох до п'яти ступенів).

Порядок розрахунку СМХ при пуску АД з фазним ротором наступний:

– в залежності від заданої кількості ступенів додаткових резисторів в ланцюзі ротору будуються графіки СМХ для кожної із ступенів (при цьому повинна виконуватись умова: $M_1 > M_c$);

– в графіках знаходяться швидкості ω_1 , ω_2 і ω_3 переключення ступенів, за якими розраховуються відповідні їм ковзання:

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= 1, \\ s_2 &= \frac{\omega_o - \omega_1}{\omega_o}, \\ s_3 &= \frac{\omega_o - \omega_2}{\omega_o} \end{aligned} \right\}; \quad (3.44)$$

3) з формули (23-4) визначаються значення опорів відповідних ступенів додаткових резисторів ротору:

$$\left. \begin{aligned} R_{\partial\partial\partial 1} &= S_1 \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} - R_2', \\ R_{\partial\partial\partial 2} &= S_2 \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} - R_2', \\ R_{\partial\partial\partial 3} &= S_3 \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} - R_2' \end{aligned} \right\}. \quad (3.45)$$

Областю застосування АД з фазним ротором (при керуванні за допомогою введення додаткових резисторів в ланцюг його ротору) є електроприводи кранових механізмів з важкими умовами пуску (з великим моментом навантаження), коли ці пуски нечасті (оскільки присутні збільшені втрати потужності в роторі через роботу двигуна з великим значенням ковзання s). При частих пусках – слід застосовувати більш економічне частотне регулювання з використанням АД з короткозамкненим ротором.

Контрольні питання

1. Спосіб пуску асинхронного двигуна з фазним ротором при введенні додаткових резисторів в ланцюг обмотки ротора. Розрахункове співвідношення для критичного моменту та критичного ковзання, для визначення опорів ступенів додаткового резистора.

2. Релейно-контакторна схема пуску АД з фазним ротором при введенні ступенів додаткового резистора в ланцюг ротора (принцип дії, відповідні статичні механічні характеристики). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

3.7 Керування синхронним двигуном

В сучасному електроприводі синхронні машини (СМ) застосовуються в високовольтних електроприводах великої потужності (більше 100 кВт, напругою 3,3кВ та 6кВ). Як правило, ці приводи є низькодинамічними (насоси, вентилятори) або взагалі нерегульованими (працюють основний час при незмінній номінальній швидкості).

Характерною особливістю СМ – є можливість (впливаючи на струм збудження синхронної машини) регулювати її реактивну потужність, що споживається або генерується, тобто при цьому СМ є компенсатором реактивної потужності для сусідніх електроспоживачів.

Існують наступні способи керування СМ:

– частотний, який є найбільш економічним способом регулювання швидкості синхронного двигуна;

2) релейно-контакторний, при якому відбувається асинхронний пуск (завдяки наявності в СД додаткової демпферної короткозамкненої обмотки на роторі) з відключенням збудження, а після розгону до підсинхронної швидкості $\omega_{ПС}$, що дорівнює (0,95-0,97) від номінальної (синхронної) швидкості ω_0 цього двигуна, здійснюється подача на обмотку ротора напруги (струму) збудження.

3.7.1 Частотне керування СД

Частотне керування синхронним двигуном (СД) характеризується відсутністю збільшених кидків моменту і статорного струму при пуску (тобто – плавним пуском), а також економічною роботою (з малими втратами потужності в двигуні) при різних значеннях n (або ω) швидкостях, які прямо пропорційні частоті $f_1[Гц]$ його статорної напруги:

$$\left. \begin{aligned} n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] &= \frac{60 f_1}{p}, \\ \omega \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] &= \frac{2\pi f_1}{p} \end{aligned} \right\}, \quad (3.46)$$

де p – число пар полюсів СД.

Силовa схема частотного керування СД, що наведена на рис.3.19, отримала назву “вентильного двигуна” (вентиль – це керований напівпровідниковий пристрій, в нашому випадку – тиристор). В цій схемі статичний перетворювач частоти (ПЧ) містить керований випрямляч (КВ), створений на тиристорах V1-V6, і автономний інвертор струму (АІС), створений на тиристорах V7-V12. В обмотку збудження, що знаходиться на роторі синхронного двигуна, подається постійна напруга від тиристорного збуджувача (ТЗ), який представляє собою малопотужний тиристорний керований випрямляч, що дозволяє регулювати значення струму збудження I_z .

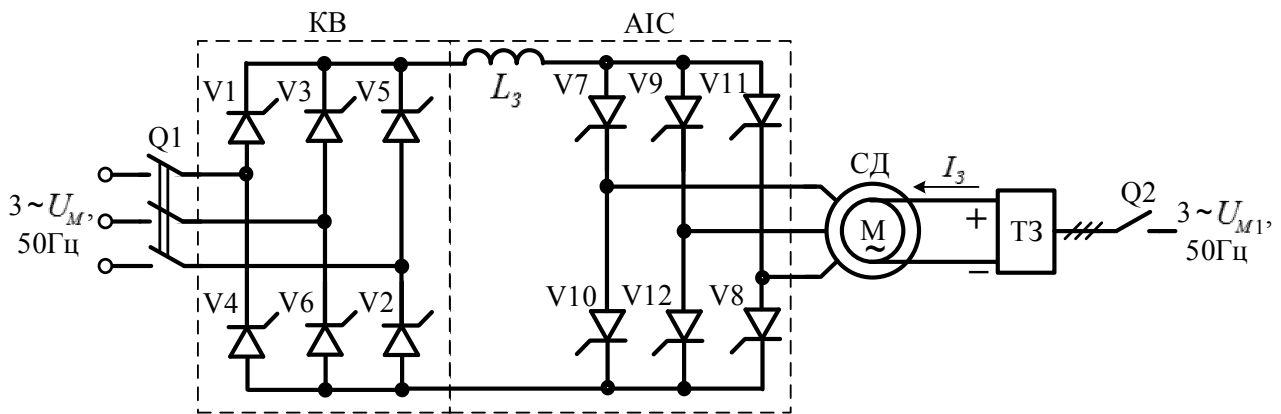


Рис.3.19 Схема вентильного двигуна

3.7.2 Релейно-контакторне керування пуском СД

Найбільш широке розповсюдження для керування пуском СД на практиці знайшли релейно-контакторні схеми, що наведені на рис. 3.20. При цьому слід зазначити, враховуючи велику потужність СД, що проблема пуску таких двигунів дуже важлива. А саме, необхідно, по можливості, зменшити амплітуду кидків статорних струмів, які інакше створять неприпустимі провали напруги в мережі живлення. Для вирішення цієї проблеми застосовують схеми, що показані на рис.3.20, б, в, г, які дозволяють зменшити пускові статорні струми.

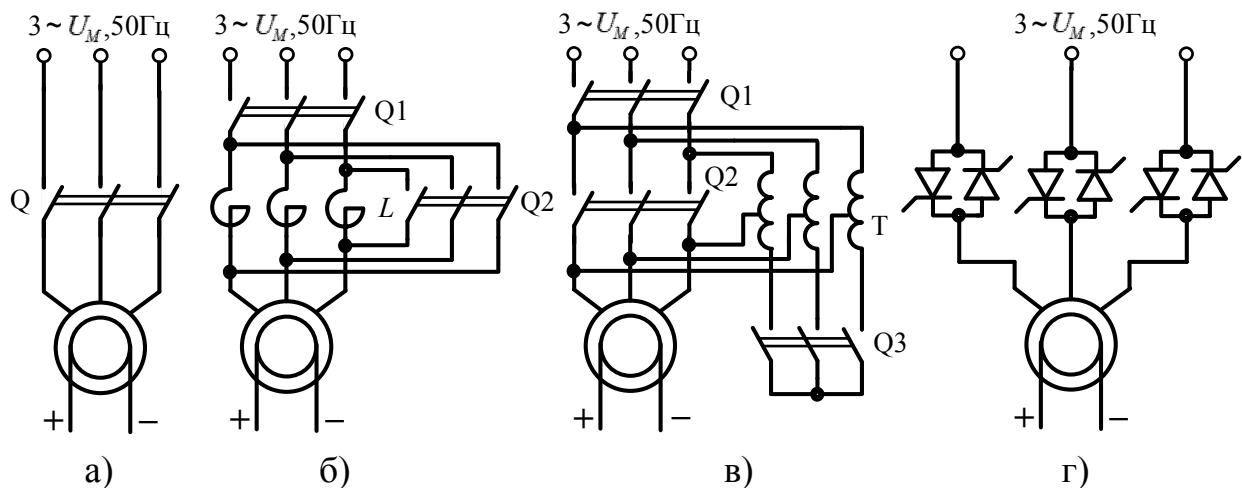


Рис.3.20 Схеми пуску синхронного двигуна: а – прямий пуск від мережі; б – з обмеженням пускових струмів реакторами L ; в – з обмеженням пускових струмів автотрансформатором; в – від тиристорного перетворювача напруги

Схема пуску СД, що наведена на рис.3.20,а забезпечує прямий пуск цього двигуна від трифазної мережі живлення без обмеження пускових струмів двигуна. Після закінчення пуску і подачі напруги (струму) в обмотку збудження для двигуна встановлюється номінальна n_n (або ω_n) швидкість, що дорівнює синхронній n_o (або ω_o):

$$\left. \begin{aligned} n_n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] &= n_o \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] = \frac{60 f_{1n}}{p}, \\ \omega_n \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] &= \omega_o \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = \frac{2\pi f_{1n}}{p} \end{aligned} \right\}, \quad (3.47)$$

де $f_{1n}=50\text{Гц}$ – номінальна частота статорної напруги.

В схемі на рис.3.20,б на початку пуску вимикач Q1 включений, Q2 – відключений, внаслідок чого початковий пуск зупиненого двигуна відбувається при додатково включених в статорні обмотки струмообмежуючих реакторів L . Після розгону двигуна до половини від номінальної швидкості включається вимикач Q2, шунтуються струмообмежуючі реактори L , статорні обмотки СД підключаються до мережі.

В схемі на рис.3.20,в на початку пуску включені вимикачі Q1 та Q3, а вимикач Q2 – виключений. Внаслідок чого на статорні обмотки двигуна подається трифазна знижена напруга з вторинної обмотки автотрансформатора Т, пускові струми двигуна зменшуються. При розгоні до половини від номінальної швидкості включається вимикач Q2 та виключається вимикач Q3, після чого на статорні обмотки двигуна подається повна трифазна напруга мережі.

В схемі на рис.3.18,г в режимі пуску плавно змінюється кут керування (від 120° до нуля) тиристорами тиристорного перетворювача напруги (ТПН), що забезпечує плавну зміну діючого значення напруги на фазних статорних обмотках СД, в результаті чого понижуються амплітудні значення пускових струмів цього двигуна.

При цьому слід зазначити, що на час пуску необхідно знеструмити обмотку збудження ротору, а паралельно з нею підключити додатковий резистор $R_p = (15 - 20)R_{O3}$. Це дозволить виключити перенапруги на обмотці збудження при пуску (якщо це не виконати, то стає можливим пробій ізоляції цієї обмотки через перенапругу, яка виникає на цій обмотці при пуску).

В якості збудника синхронного двигуна використовуються тиристорний збудник (виконаний на основі трифазної мостової схеми нереверсивного керованого випрямляча) або електромашинний збудник, створений на основі малопотужного генератора постійного струму з паралельною обмоткою збудження, який встановлено на валу синхронного двигуна СД.

Схеми на рис.3.21 містять наступні умовні позначення: КЛ – лінійний контактор; КЗ – контактор збудження; СД – синхронний двигун; Г – генератор постійного струму, який виконує роль збудника (тобто який подає постійну напругу до обмотки збудження синхронного двигуна); ОЗГ – обмотка збудження генератора; РА – струмове реле (включається при пусковому струмі СД); РП – проміжне реле; КЛ – лінійний контактор; Q – автоматичний вимикач; КнС і КнП – кнопки “Стоп” і “Пуск” відповідно.

Схеми, які представлені на рис.3.21, функціонують наступним чином. При зупиненому СД лінійний контактор КЛ, контактор збудження КЗ, струмове РА та проміжне РП реле виключені.

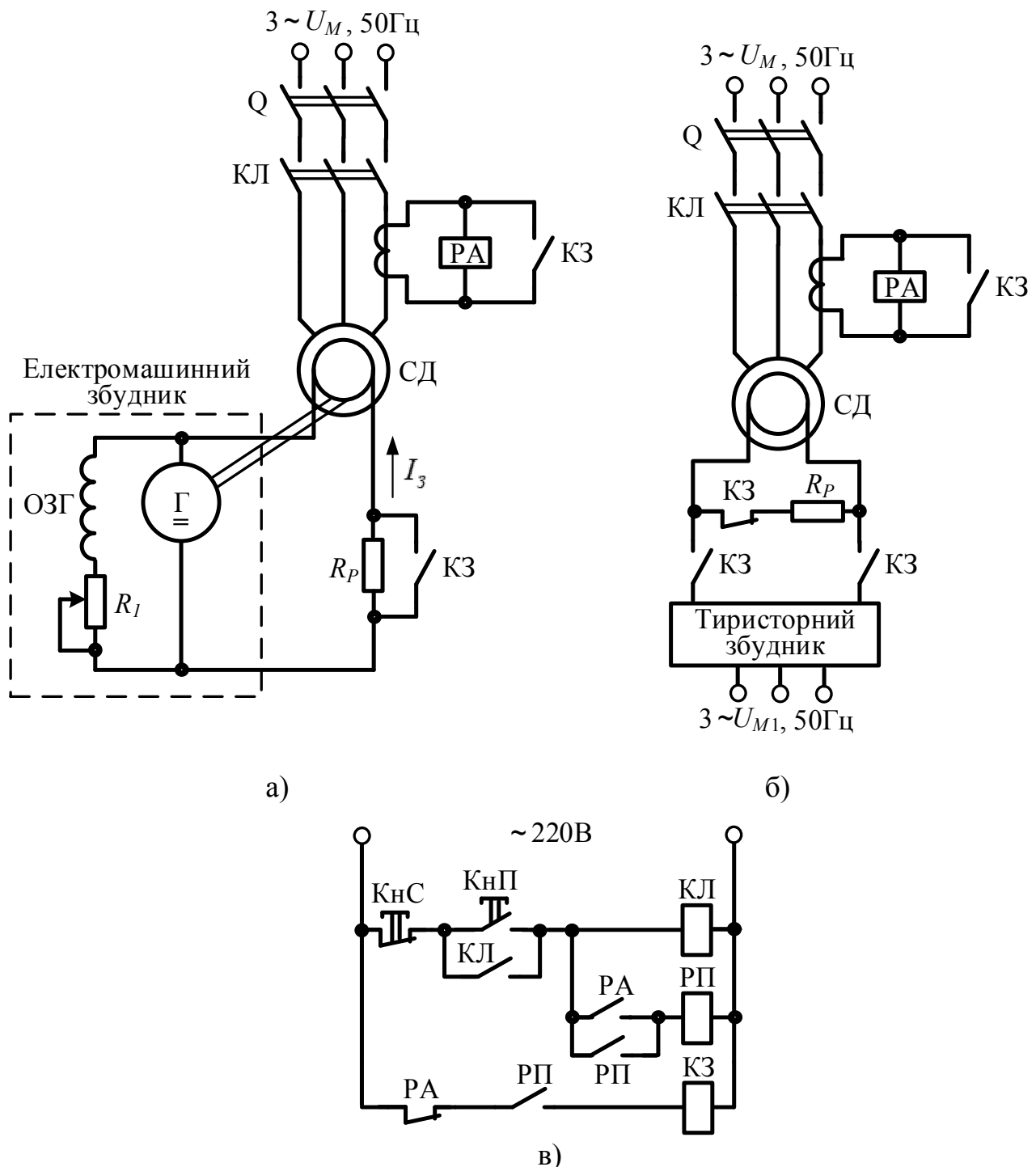


Рис.3.21 Схема керування пуском синхронного двигуна (а – з електромашинним збудником; б – з тиристорним збудником; в – релейно-контакторна схема керування)

При натисканні кнопки КнП включається контактор КЛ, стає на самопідхоплення, на статорні обмотки подається трифазна мережна напруга,

виникають пускові струми великого значення (3-5 кратні від номінального струму двигуна), реле РА включається, включається реле РП і стає на самопідхоплення. При зупиненому двигуні напруга генератора Г близька до нуля, струм в обмотці збудження синхронного двигуна близький до нуля. Починається асинхронний пуск СД (за допомогою короткозамкненої демпфної обмотки, що присутня на роторі цього двигуна АД).

По мірі розгону збільшується швидкість ω , а відповідно, якірна напруга збуджувача Г, але із-за включеного резистора R_p великої величини струм I_z збуджувача буде залишатися малим ($I_z \approx 0$).

При розгоні до підсинхронної швидкості $\omega_{ПС} = 0,95\omega_0$ статорний струм зменшується, струмове реле РА – виключається. Через його нормально-замкнений контакт включається контактор КЗ, через н.в. контакти якого напруга збудників (генератора Г або тиристорного збудника) безпосередньо поступає до обмотки збудження (оминаючи резистор R_p , який знеструмлюється). Виникає необхідний (номінальний) струм збудження I_z в обмотці збудження синхронного двигуна.

Після цього відбувається втягування СД в синхронізм. Пуск синхронного двигуна закінчений, він у подальшому працює в сталому режимі з номінальною швидкістю: $\omega = \omega_H$.

Статичні механічні характеристики синхронного двигуна при пуску та у сталому режимі наведені на рис.3.22. На цьому рисунку ділянка 1-2 відповідає асинхронному пуску двигуна; 2-3 – його втягуванню до синхронізму (самосинхронізація); точка 3 – сталому режиму роботи на природній СМХ. При цьому природна СМХ для синхронного двигуна представляє собою ділянку горизонтальної прямої.

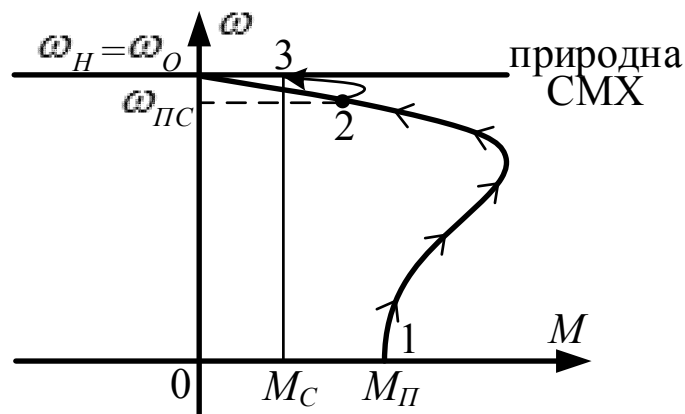


Рис.3.22. Статичні механічні характеристики СД при пуску і в сталому режимі

Відмітимо, що в сучасних синхронних електроприводах перевага віддається тиристорному типу збудника (який у порівнянні з електромашинним є більш економічним і відрізняється підвищеною експлуатаційною надійністю, оскільки не містить механічних частин, що обертаються).

Важливими перевагами синхронного електропривода є:

- ідеально жорстка статична механічна характеристика;
- можливість (впливаючи на струм обмотки збудження) виконувати одночасно функцію компенсатора реактивної потужності сусідніх електроспоживачів.

До недоліків синхронного електропривода відносяться:

- відносна технічна складність машини (що пов'язана з ускладненою конструкцією цього двигуна та необхідністю наявності для нього двох джерел енергії: постійної та трифазної змінної напруги);

- наявність в СД рухомого електричного контакту (між електрографітовими щітками та контактними кільцями на роторі), що збільшує експлуатаційні витрати з обслуговування двигуна та обмежує його область застосування (неможливе використання СД у вибухонебезпечних, агресивних і запилених середовищах).

Контрольні питання

1. Перерахувати основні способи керування синхронним двигуном. Привести схеми для зниження пускових струмів синхронного двигуна та пояснити їх принцип дії.

2. Частотно-керований синхронний двигун (схема вентильного двигуна, її складові елементи та принцип дії, переваги та недоліки, вид статичних механічних характеристик двигуна).

3. Релейно-контакторна схема пуску синхронного двигуна (назва та призначення всіх елементів схеми, опис функціонування схеми, побудова відповідних статичних механічних характеристик та часових діаграм швидкості, електромагнітного моменту та якірного струму двигуна, максимально допустимі значення якірного струму та електромагнітного моменту). Побудова на механічній діаграмі годографів зміни швидкості та моменту двигуна при пуску, сталому режимі роботи та при гальмуванні.

4 ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ, РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ДВИГУНА

4.1 Енергетика електроприводів

Під поняттям “енергетики електропривода” будемо розуміти питання споживання і розходу електроенергії, втрат потужності та енергії в електроприводах постійного й змінного струму.

При подальшому аналізі енергетичних режимів доцільно розділити існуючі електроприводи в залежності від особливостей їх роботи на наступні групи:

- нерегульовані електроприводи, що працюють у сталих режимах на природній механічній характеристиці двигуна;
- регульовані електроприводи за швидкістю, що працюють в сталих режимах;
- регульовані електроприводи за швидкістю, що працюють в циклічних (пускогальмівних) режимах.

4.1.1 Коефіцієнт корисної дії електропривода

Найважливішим енергетичним показником електропривода є його коефіцієнт η_{EP} корисної дії (ККД), який розраховується для електроприводів, що працюють у сталих режимах, із співвідношень:

$$\eta_{EP} = \frac{P_2}{P_{1EP}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{EP}}, \quad (4.1)$$

де

$$P_2 = M\omega \quad (4.2)$$

вихідна корисна механічна потужність двигуна (M та ω – відповідно електромагнітний момент та швидкість двигуна);

$$P_{1EP} = P_2 + \Delta P_{EP} \quad (4.3)$$

потужність електропривода, що споживається з електричної мережі ΔP_{EP} – загальні (сумарні) втрати потужності в електроприводі.

Для електроприводів, які частину свого часу працюють в динамічних (пускогальмівних) режимах, коефіцієнт корисної дії електропривода визначається з залежності:

$$\eta_{EP} = \frac{W_2}{W_{1EP}} = \frac{W_2}{W_2 + \Delta W_{EP}}, \quad (4.4)$$

де

$$W_{1EP} = \int_0^{t_y} P_{1EP} dt \quad (4.5)$$

електроенергія, що споживається електроприводом (за часовий цикл повторення t_y) з електричної мережі;

$$W_2 = \int_0^{t_u} P_2 dt \quad - \quad (4.6)$$

вихідна корисна механічна енергія двигуна (що створюється ним за той же часовий цикл повторення t_u);

$$\Delta W = \int_0^{t_u} \Delta P dt \quad - \quad (4.7)$$

загальні (сумарні) втрати енергії в електроприводі за згаданий часовий цикл повторення t_u .

Звернемо увагу на те, що енергетичні показники електропривода суттєво залежать від режимів його роботи, значень електромагнітного моменту M і кутової частоти обертання (швидкості) ω , що розвиваються в цих режимах, а також від значення мережної напруги U_1 . Тому на практиці в паспортних даних для всіх типів електроприводів зазначається тільки номінальне значення η_H коефіцієнта корисної дії, яке властиве для сталого режиму роботи конкретного електропривода (тобто – при номінальній напрузі мережи $U_1 = U_{1H}$, номінальній вихідній корисній потужності $P_2 = P_{2H}$ і номінальній швидкості $\omega = \omega_H$).

Номінальне значення $\eta_{EP.H}$ ККД електропривода розраховується з врахуванням (4.1) з співвідношення:

$$\eta_{EP.H} = \frac{P_{2H}}{P_{1EP.H}} = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + \Delta P_{EP.H}}, \quad (4.8)$$

де $P_{1EP.H}$ – потужність електропривода, що споживається з електричної мережі в номінальному режимі;

$\Delta P_{EP.H}$ – загальні (сумарні) втрати потужності в електроприводі в номінальному режимі,

4.1.2 Втрати потужності в нерегульованих електроприводах, що працюють в сталих режимах на природній механічній характеристиці двигуна

При аналізі енергетичних режимів електроприводів, в яких електродвигуни функціонують на своїй природній СМХ, можна на практиці вважати швидкість ω двигуна незмінною та близькою до її номінального значення: $\omega \approx \omega_H$. Для таких електроприводів загальні втрати потужності ΔP_{EP} електропривода дорівнюють загальним втратам потужності ΔP двигуна і знаходяться у вигляді суми двох складових:

$$\Delta P_{EP} = \Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{змін}, \quad (4.9)$$

де $\Delta P_{пост}$ – постійні втрати потужності (що не залежать від навантаження двигуна);

$\Delta P_{змін}$ – змінні втрати потужності, що залежать від навантаження двигуна.

При цьому постійні втрати потужності для розглядуваних нерегульованих електроприводів можуть бути розраховані з залежностей:

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{ОЗ.Н} + \Delta P_{МХ.Н} + \Delta P_{С.Н} - \quad (4.10)$$

стосовно до двигунів постійного струму незалежного збудження;

$$\Delta P_{пост} = \left(\frac{U_1}{U_{1Н}} \right)^2 (\Delta P_{С.Н} + 3I_{mН}^2 R_1) + \Delta P_{МХ.Н} - \quad (4.11)$$

для асинхронних двигунів;

$$\Delta P_{пост} = \left(\frac{U_1}{U_{1Н}} \right)^2 \Delta P_{С.Н} + \Delta P_{ОЗ.Н} + \Delta P_{МХ.Н} - \quad (4.12)$$

для синхронних двигунів.

В залежностях (4.10), (4.11) та (4.12) використовуються наступні позначення:

$\Delta P_{МХ.Н}$ – номінальні механічні втрати потужності двигуна;

$\Delta P_{С.Н}$ – номінальні втрати потужності в сталі осердя (якоря або статора) електродвигуна;

$$\Delta P_{ОЗ.Н} = U_{3Н} I_{3Н} - \quad (4.13)$$

номінальне значення втрат потужності в ланцюзі збудження ДПС незалежного збудження або синхронного двигуна (яке на практиці складає 1–3% від номінальної потужності зазначених двигунів та відповідає номінальним значенням напруги $U_{3Н}$ та струму $I_{3Н}$ обмоток збудження);

U_1 та $U_{1Н}$ – відповідно фактичне та номінальне діючі значення фазної статорної напруги асинхронного двигуна;

$I_{mН}$ – номінальне значення намагнічуючого струму асинхронного двигуна (що розраховується зі схеми заміщення на рис.3.1 для номінального режиму цього двигуна);

R_1 – значення активного опору фазної статорної обмотки асинхронного двигуна.

Для нерегульованих електроприводів змінні втрати потужності $\Delta P_{змін}$ (що залежать від струму навантаження електродвигуна) представляють собою втрати потужності у мідних (або алюмінієвих) провідниках електричних обмоток якоря (для ДПС незалежного збудження) або статорних і роторних обмоток (для асинхронних двигунів).

Для згаданого двигуна постійного струму змінні втрати потужності знаходяться із залежності:

$$\Delta P_{змін} = I_{я}^2 R_{я} = I_{яН}^2 R_{я} \left(\frac{I_{я}}{I_{яН}} \right)^2 = \Delta P_{змін.Н} \cdot \lambda_1^2, \quad (4.14)$$

де $I_{я}$ та $I_{яН}$ – фактичне і номінальне значення якірного струму двигуна відповідно;

$R_{я}$ – опір якірної обмотки двигуна;

$$\Delta P_{\text{змін.Н}} = I_{\text{ЯН}}^2 R_{\text{Я}} - \quad (4.15)$$

номінальне значення змінних втрат потужності двигуна постійного струму.

Для асинхронних двигунів (з короткозамкненим і фазним ротором) змінні втрати потужності визначаються у вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{змін}} &= 3I_1^2 R_1 + 3(I'_2)^2 R'_2 = 3(I'_2)^2 (R_1 / \sigma^2 + R'_2) \approx \\ &\approx 3(I'_{2H})^2 \left(\frac{R_1}{\sigma_H^2} + R'_2 \right) \left(\frac{I'_2}{I'_{2H}} \right)^2 = \Delta P_{\text{змін.Н}} \cdot \lambda_2^2, \end{aligned} \quad (4.16)$$

де I_1 – фактичне діюче значення статорного струму двигуна;

I'_2 та I'_{2H} – відповідно фактичне і номінальне діючі значення роторного струму (приведеного до статору) двигуна;

R_1 – активний опір фазної статорної обмотки двигуна;

R'_2 – активний опір фазної роторної обмотки (приведений до статору) двигуна;

$$\Delta P_{\text{змін.Н}} = 3I_{1H}^2 R_1 + 3(I'_{2H})^2 R'_2 - \quad (4.17)$$

номінальне значення змінних втрат потужності асинхронного двигуна;

$$\sigma = \frac{I'_2}{I_1} - \quad (4.18)$$

коефіцієнт, що характеризує відношення роторного струму I'_2 (приведеного до статору) до статорного струму I_1 асинхронного двигуна (номінальне значення цього коефіцієнту складає: $\sigma_H = I'_{2H} / I_{1H} \approx 0,85 - 0,95$).

Для синхронних двигунів змінні втрати потужності розраховуються із співвідношення:

$$\Delta P_{\text{змін}} = 3I_1^2 R_1 = 3I_{1H}^2 \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 R_1 = \Delta P_{\text{змін.Н}} \cdot \lambda_3^2, \quad (4.19)$$

де I_1 та I_{1H} – фактичне і номінальне значення статорного струму двигуна відповідно;

R_1 – активний опір фазної статорної обмотки двигуна;

$\Delta P_{\text{змін.Н}}$ – номінальне значення змінних втрат потужності синхронного двигуна.

Згідно останнім виразам з формул (4.14), (4.16) і (4.19) змінні втрати потужності $\Delta P_{\text{змін}}$ нерегульованих електроприводів, що працюють на природній механічній характеристиці, можна визначати у вигляді добутку номінального значення $\Delta P_{\text{змін.Н}}$ цих втрат потужності на квадрат кратності λ_1 , λ_2 або λ_3 струму відповідного двигуна, де значення згаданих кратностей струму розраховуються з наступних залежностей:

$$\lambda_1 = I_{\text{Я}} / I_{\text{ЯН}} - \quad (4.20)$$

для двигуна постійного струму;

$$\lambda_2 = I'_2 / I'_{2H} \quad - \quad (4.21)$$

для асинхронного двигуна;

$$\lambda_3 = I_1 / I_{1H} \quad - \quad (4.22)$$

для синхронного двигуна.

Таким чином, для визначення змінної складової $\Delta P_{змін}$ втрат потужності нерегульованого електропривода потрібне знаходження струмів навантаження в обмотках електродвигуна, для чого використовуються електромеханічні характеристики зазначених двигунів.

4.1.3 Електромеханічні характеристики електричних машин

Електромеханічною характеристикою (ЕМХ) електричної машини називається залежність її струму навантаження від інших її параметрів (наприклад, значення напруги живлення, електромагнітного моменту, швидкості або ковзання, значень конструктивної сталої або параметрів схеми заміщення).

Для двигуна постійного струму (ДПС) незалежного збудження ЕМХ залежить згідно останнього рівняння з (2.1) тільки від значень електромагнітного моменту M , що ним розвивається, магнітного потоку Φ , що в ньому створюється, та відповідної цьому двигуну конструктивної сталої c . З врахуванням цього при номінальному значенні магнітного потоку Φ_H (що відповідає природній статичній механічній характеристиці даного двигуна) електромеханічна характеристика описується аналітичною залежністю:

$$I_a = \frac{M}{c\Phi_H}, \quad (4.23)$$

яка, вочевидь, характеризує прямо пропорційний зв'язок між собою електромагнітного моменту M і якріного струму цього двигуна.

Для асинхронних двигунів (з короткозамкненим і фазним ротором), що працюють на природній СМХ, електромеханічною залежністю зазвичай є в сталих режимах роботи залежність діючого значення фазного статорного струму I_1 від діючих значень фазної статорної напруги U_1 живлення і ковзання s :

$$I_1 = f(U_1, s) = \frac{U_1}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (4.24)$$

де

$$\left. \begin{aligned} a &= \operatorname{Re}(a + jb), \\ b &= \operatorname{Im}(a + jb), \\ a + jb &= R_1 + jx_1 + \frac{(jx_m) \left(\frac{R'_2}{s} + jx'_2 \right)}{\frac{R'_2}{s} + j(x_m + x'_2)} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (4.25)$$

У залежностях (4.24) та (4.25) використовуються наступні позначення:

$a + jb$ – значення (в комплексній формі) результуючого опору асинхронного двигуна;

a та b – відповідно дійсна та уявна частини результуючого опору АД;

Re – математична операція виділення дійсної частини комплексного числа;

Im – математична операція виділення уявної частини комплексного числа;

$R_1, R'_2, x_1, x'_2, x_m$ – параметри “Т-образної” схеми заміщення асинхронного двигуна;

$j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Для асинхронних двигунів, що працюють на природній СМХ, знаходження в сталому режимі фазного статорного струму I_1 при заданому статичному моменті M_C здійснюється у два етапи. На першому етапі при змінні від нуля і вище ковзання s розраховується з залежності (3.2) електромагнітний момент M двигуна. В результаті цього розрахунку знаходиться ковзання s , що відповідає створенню електромагнітного моменту M двигуна, що дорівнює M_C . На другому етапі, підставивши це значення ковзання s в залежності (4.24) і (4.25), отримаємо (згідно електричної схеми заміщення АД на рис.3.1) шукане значення фазного статорного струму I_1 для цього двигуна.

Виходячи з відомих із теорії електричних машин співвідношень для втрат потужності АД, що працює на природній СМХ:

$$\Delta P_2 = M \omega_o s, \quad (4.26)$$

$$\Delta P_2 = 3(I'_2)^2 R'_2, \quad (4.27)$$

отримаємо (після прирівнювання цих співвідношень між собою) аналітичну залежність для розрахунку фазного роторного струму I'_2 (приведеного до статору) в наступному вигляді:

$$I'_2 = \sqrt{\frac{M \omega_o s}{3 R'_2}}, \quad (4.28)$$

що слугує для визначення з (4.16) кратності струму навантаження λ_2 АД.

В залежностях (4.26) – (4.28) використовуються наступні позначення:

ω_o – синхронна швидкість АД, що розраховується з (3.1);

M – електромагнітний момент двигуна (що дорівнює в сталому режимі статичному моменту M_C привода);

s – ковзання АД, значення якого розраховується з (3.11) для природної СМХ цього двигуна при електромагнітному моменту $M = M_C$, що він розвиває;

R'_2 – активний опір фазної обмотки ротора двигуна (приведений до статору).

Для синхронних двигунів (СД), що працюють в сталому режимі на природній СМХ цього двигуна з синхронною швидкістю ω_o , яка визначається з (3.47), електромеханічна характеристика представляється наступною залежністю:

$$I_1 = \frac{M\omega_o}{3U_1 \cos \varphi}, \quad (4.29)$$

де M – електромагнітний момент двигуна, що розвивається (який дорівнює в сталих режимах статичному моменту M_C привода);

U_1 – діюча фазна статорна напруга;

φ – кут зсуву між фазними статорними струмом і напругою двигуна (регулюється струмом обмотки збудження двигуна; номінальне значення цього кута зсуву звичайно складає 25-30 ел.град).

4.1.4 Втрати потужності в сталих режимах для регульованих за швидкістю електроприводів постійного струму

При подальшому аналізі енергетичних режимів електроприводів під регульованими за швидкістю електроприводами постійного і змінного струму будемо розуміти такі, у яких в сталих режимах швидкість двигуна може приймати значення, що помітно відрізняються від номінальної швидкості. Ці нерегульовані електроприводи працюють, вочевидь, на штучних статичних механічних характеристиках, що відповідають раніше розглянутим в розділах 2 і 3 відомим способам регулювання швидкості двигунів постійного і змінного струму.

В регульованих за швидкістю електроприводах постійного і змінного струму від значення струму навантаження двигунів залежить значення змінної складової $\Delta P_{змін}$ втрат потужності, а від кутової частоти обертання (швидкості) ω двигунів – значення постійної складової $\Delta P_{пост.}$ втрат потужності ΔP регульованого за швидкістю двигуна. При цьому загальні втрати потужності ΔP двигуна в таких електроприводах аналогічно (4.9) розраховуються з залежності:

$$\Delta P_{ЕП} = \Delta P = \Delta P_{пост.} + \Delta P_{змін}, \quad (4.30)$$

у вигляді суми постійної $\Delta P_{пост.}$ і змінної $\Delta P_{змін}$ складових втрат потужності двигуна, що застосовується.

Для двигунів постійного струму незалежного збудження постійна складова втрат потужності представляє собою суму втрат потужності в ланцюгу обмотки збудження ΔP_{O3} , механічних втрат потужності ΔP_{MX} та втрат потужності в сталі ΔP_C :

$$\Delta P_{пост.} = \Delta P_{O3} + \Delta P_{MX} + \Delta P_C. \quad (4.31)$$

Кожний з зазначених вище доданків втрат потужності може бути розрахований з наступних співвідношень:

$$\Delta P_{O3} = U_3 I_3 = \Delta P_{O3.H} \left(\frac{U_3 I_3}{U_{3H} I_{3H}} \right), \quad (4.32)$$

$$\Delta P_{MX} = \Delta P_{MX.H} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2, \quad (4.33)$$

$$\Delta P_C = \Delta P_{C.H} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2, \quad (4.34)$$

де U_3 та I_3 – відповідно напруга і струм обмотки збудження;

ω та ω_H – відповідно фактичне і номінальне значення швидкості двигуна;

$\Delta P_{MX.H}$ та $\Delta P_{C.H}$ – номінальні значення відповідно механічних втрат потужності і втрат потужності в сталі двигуна (що відповідають номінальному значенню швидкості);

$\Delta P_{O3.H}$ – номінальне значення втрат потужності ланцюга обмотки збудження (яке складає на практиці 1-3% від номінальної потужності P_{2H} двигуна та відповідає номінальним значенням напруги U_{3H} і струму I_{3H} обмотки збудження).

Підставивши співвідношення (4.32)–(4.34) в залежність (4.31), отримаємо остаточний аналітичний вираз для розрахунку постійної складової втрат потужності для ДПС незалежного збудження:

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{O3.H} \left(\frac{U_3 I_3}{U_{3H} I_{3H}} \right) + (\Delta P_{MX.H} + \Delta P_{C.H}) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2. \quad (4.35)$$

Для способу регулювання швидкості ДПС незалежного збудження введенням в ланцюг якоря додаткового резистора $R_{доd}$ визначаються з врахуванням (4.14) сумарні змінні втрати потужності в активному опорі якоря і додатковому резисторі із співвідношення:

$$\Delta P_{змін} = I_A^2 (R_A + R_{доd}) = M(\omega_{OH} - \omega), \quad (4.36)$$

де M – електромагнітний момент двигуна;

$\omega_{OH} = U_{яH} / c \Phi_H$ – номінальна основна швидкість двигуна;

Для способу регулювання швидкості ДПС незалежного збудження ослабленням магнітного потоку криву намагнічування у межах зміни струму збудження від нуля до номінального значення можна приблизно апроксимувати аналітичною залежністю:

$$\frac{I_3}{I_{3H}} \approx \left(\frac{\Phi}{\Phi_H} \right)^m = \left(\frac{\omega_{OH}}{\omega_O} \right)^m = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^m, \quad (4.37)$$

де ω_O – основна швидкість при ослабленні магнітного потоку Φ ;

ω_{OH} – номінальна основна швидкість (при номінальному магнітному потоці Φ_H);

I_3 та I_{3H} – значення струму обмотки збудження, що відповідають ослабленому Φ і номінальному Φ_H значенням магнітного потоку двигуна;

ω_H та ω – відповідно номінальне і фактичне (при ослабленому магнітному потоці) значення швидкості двигуна (де $\omega > \omega_H$);

$1 < m < 2$ – апроксимуючий показник ступеня (який вибирається в зазначених межах конкретно для застосованого типу двигуна).

З врахуванням цього при ослабленні магнітного потоку ДПС незалежного збудження значення постійної складової втрат потужності двигуна визначається з (4.35) у наступному вигляді:

$$\Delta P_{\text{пост. осл}} = \Delta P_{O3.H} \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^m + (\Delta P_{MX.H} + \Delta P_{C.H}) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2. \quad (4.38)$$

Для способу регулювання швидкості ДПС незалежного збудження *змінною якірною напругою* загальні втрати потужності ΔP_{EP} електропривода включають в себе втрати потужності двигуна ΔP і тиристорного перетворювача ΔP_{TP} , а також втрати потужності ΔP_{HB} на незалежну вентиляцію (якщо вона застосовується):

$$\Delta P_{EP} = \Delta P + \Delta P_{TP} + \Delta P_{HB}. \quad (4.39)$$

Застосування додатково незалежної вентиляції (у вигляді окремого електродвигуна, що обертає вентилятор, який обдуває основний двигун, що регулюється) обумовлено погіршенням умов самовентиляції основного регульованого двигуна при зниженні його швидкості та слугує для збереження його вихідної потужності на рівні номінальної у всьому діапазоні регульованих робочих швидкостей.

Оскільки визначення втрат потужності ΔP вже раніше було розглянуто і відбувається за допомогою залежностей (4.30), (4.14), (4.23) та (4.28), зупинимось далі детально на знаходженні втрат потужності ΔP_{TP} в тиристорному перетворювачі. Ці втрати потужності (як і для електродвигуна) складаються з постійної $\Delta P_{\text{пост. TP}}$ та змінної $\Delta P_{\text{змін. TP}}$ складових:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{\text{пост. TP}} + \Delta P_{\text{змін. TP}}. \quad (4.40)$$

При цьому постійна складова $\Delta P_{\text{пост. TP}}$ втрат потужності тиристорного перетворювача залишається практично незмінною та викликана втратами потужності на примусову систему вентиляції ΔP_{PCB} перетворювача і втратами потужності ΔP_{CKP} в системі керування перетворювачем:

$$\Delta P_{\text{пост. TP}} = \Delta P_{PCB} + \Delta P_{CKP} \approx \text{const}. \quad (4.41)$$

При цьому для перетворювачів середньої і великої потужності примусова система вентиляції виконується у вигляді окремого електродвигуна, який обертає вентилятор, який обдуває поверхні охолоджувачів тиристорів (в перетворювачах малої потужності примусова система вентиляції відсутня: $\Delta P_{PCB} = 0$, оскільки звичайно в них застосовується природне повітряне охолодження).

Змінна складова $\Delta P_{\text{змін.ТП}}$ втрат потужності тиристорного перетворювача постійного струму може бути наближено визначена із залежності:

$$\Delta P_{\text{змін.ТП}} \approx (\Delta P_{\text{ДР.Н}} + \Delta P_{\text{ОШ.Н}}) \left(\frac{I_{\text{Я}}}{I_{\text{ЯН}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{В.Н}} \left(\frac{I_{\text{Я}}}{I_{\text{ЯН}}} \right), \quad (4.42)$$

де $\Delta P_{\text{ДР.Н}}$ – втрати потужності при номінальному струмі якоря в згладжуючому дроселі, струмообмежуючому і зрівнювачу реакторах тиристорного перетворювача;

$\Delta P_{\text{В.Н}}$ – втрати потужності при номінальному струмі якоря у вентилях (тиристорах) тиристорного перетворювача;

$$\Delta P_{\text{ОШ.Н}} \approx 0,01 U_{\text{ЯН}} I_{\text{ЯН}} - \quad (4.43)$$

номінальне значення втрат потужності в ошиновці перетворювача.

4.1.5 Втрати потужності в сталіх режимах регульованих за швидкістю асинхронних електроприводів

Регульовані асинхронні електроприводи працюють, як було відзначено раніше, на штучних статичних механічних характеристиках, що відповідають розглянутим в розділі 3 способам регулювання асинхронних двигунів, а знаходження втрат потужності ΔP для них здійснюється аналогічно раніше приведеній залежності (4.30) у вигляді суми постійної $\Delta P_{\text{пост.}}$ і змінної $\Delta P_{\text{змін.}}$ складових цих втрат

Для асинхронних двигунів, що отримують живлення від трифазної мережі змінної напруги номінальної частоти (рівної 50 Гц), в яких використовується параметричне керування цим двигуном (тобто, змінюється значення будь-якого параметра його схеми заміщення на рис.3.4, наприклад – вводяться додаткові резистори $R_{\text{доп}}$ в трифазні обмотки ротору), постійна складова $\Delta P_{\text{пост.}}$ втрат потужності двигуна знаходиться з залежності:

$$\Delta P_{\text{пост.}} = \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right) [\Delta P_{\text{С.1Н}} (1 + s^{1,3}) + 3 I_{\text{тН}}^2 R_1] + \Delta P_{\text{МХ.Н}} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2. \quad (4.44)$$

В останній залежності номінальне значення втрат потужності в сталі осердя статора $\Delta P_{\text{С.1Н}}$ визначається через номінальне значення загальних втрат в сталі $\Delta P_{\text{С.Н}}$ асинхронного двигуна із співвідношення:

$$\Delta P_{\text{С.1Н}} = \frac{\Delta P_{\text{С.Н}}}{1 + (s_H)^{1,3}}, \quad (4.45)$$

де номінальне значення втрат потужності в сталі $\Delta P_{\text{С.Н}}$ звичайно складає (15-25)% від номінального значення загальних втрат потужності $\Delta P_{\text{Н}}$ цього двигуна.

В залежностях (4.44) та (4.45) застосовуються наступні позначення:

$\Delta P_{\text{МХ.Н}}$ – механічні втрати потужності (на тертя у підшипниках і на роботу вентилятора) двигуна, які звичайно складають (5-10)% від номінального значення загальних втрат потужності $\Delta P_{\text{Н}}$ АД;

U_1 та U_{1H} – діючі значення відповідно фактичного і номінального фазних статорних напруг двигуна;

ω та ω_H – відповідно фактичне і номінальне значення швидкості двигуна;

I_{mH} – номінальне значення намагнічуючого струму двигуна;

R_1 – значення активного опору фазної статорної обмотки;

s та s_H – відповідно фактичне і номінальне значення ковзання АД.

Для цього ж двигуна змінні втрати потужності в електродвигуні $\Delta P_{змін}$ та електроприводі $\Delta P_{змін.ЕП}$ (при відсутності або наявності додаткового резистора $R_{доd}$ у ланцюзі ротору асинхронного двигуна з фазною обмоткою ротора) визначаються з наступних залежностей:

$$\Delta P_{змін} = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2' = M\omega_o s \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) - \quad (4.46)$$

для цього двигуна (при відсутності додаткового резистора $R_{доd} = 0$)

$$\Delta P_{змін.ЕП} = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 (R_2' + R_{доd}') = M\omega_o s \left(1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{доd}'} \right) - \quad (4.47)$$

для електропривода (загальні втрати в двигуні і додатковому резисторі $R_{доd}$ при введенні останнього в ланцюг ротору);

$$\Delta P_{змін} = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2' = M\omega_o s \left(1 + \frac{R_1 + R_2'}{R_2' + R_{доd}'} \right) - \quad (4.48)$$

для двигуна (при наявності додаткового резистора $R_{доd}$ у ланцюзі ротору).

В залежностях (4.46) – (4.48) використовуються наступні позначення:

I_1 та I_2' – відповідно діючі значення статорного струму і роторного струму (приведеного до статорної обмотки) АД, які обчисленні зі схеми заміщення цього двигуна на рис.3.1;

M – електромагнітний момент двигуна;

ω_o та s – відповідно синхронна швидкість та ковзання двигуна;

R_1 та R_2' – відповідно активний опір фазних статорної і роторної (приведеної до статору) обмоток двигуна;

$R_{доd}'$ – значення активного опору додаткового резистора, включеного в ланцюг роторної обмотки, яке приведенне до статору із співвідношення (3.42).

Для частотного-керованого асинхронного електропривода загальні втрати потужності $\Delta P_{ЕП}$ в електроприводі складаються із загальних втрат потужності в двигуні ΔP та перетворювачі частоти $\Delta P_{ПЧ}$, а також з втрат потужності на незалежну вентиляцію ΔP_{HB} (призначення, будова та доцільність застосування якої ідентично розглянутому раніше для тиристорних перетворювачів постійного струму):

$$\Delta P_{ЕП} = \Delta P + \Delta P_{ПЧ} + \Delta P_{HB} - \quad (4.49)$$

Аналогічно співвідношенню (4.30) загальні втрати потужності ΔP частотно-регульованого асинхронного двигуна складаються з постійної $\Delta P_{пост}$ та змінної $\Delta P_{змін}$ складових, які при найбільш розповсюджених на практиці законах частотного керування (пропорційному і при незмінності головного магнітного потоку двигуна) розраховується з аналітичних залежностей:

$$\Delta P_{пост} \approx \Delta P_{C1.H} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^{1,3} + \Delta P_{MX.H} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 + 3R_1 I_m^2 + \Delta P_{B.G}, \quad (4.50)$$

$$\Delta P_{змін} = 3R_1 I_1^2 + 3R_2' (I_2')^2 \approx \Delta P_{змін.H} \left(\frac{M}{M_H} \right)^2. \quad (4.51)$$

В цих залежностях використовуються наступні позначення

$\Delta P_{C1.H}$ та $\Delta P_{MX.H}$ – номінальні значення відповідно втрат у сталі та механічних втрат потужності двигуна;

$\Delta P_{B.G}$ – втрати потужності від дії вищих гармонік статорних струмів (оскільки для сучасних статичних перетворювачів частоти характерна несинусоїдальна форма їх вихідних струмів);

I_1 та I_2' – діючі значення перших гармонійних складових відповідно статорного струму та роторного струму, приведенного до статору;

I_m – струм намагнічування частотно-регульованого АД, який визначається з його схеми заміщення на рис.3.4 (причому для закону частотного керування АД при незмінності головного магнітного потоку справедливо: $I_m = I_{mH} = const$);

R_1 та R_2' – активні опори відповідно статора і ротору (приведеного до статору);

M та M_H – фактичне і номінальне значення електромагнітного моменту двигуна;

$\Delta P_{змін.H}$ – номінальні значення змінних втрат потужності двигуна;

ω та ω_H – фактичне і номінальне значення швидкості двигуна.

При цьому номінальне значення змінних втрат потужності $\Delta P_{змін.H}$ і втрат потужності $\Delta P_{B.G}$, які викликані вищими гармоніками статорного струму, визначаються з залежності:

$$\Delta P_{змін.H} \approx 3(R_1 + \sigma_H^2 R_2') I_{1H}^2, \quad (4.52)$$

$$\Delta P_{B.G} \approx (0,1 - 0,25) \Delta P_{змін.H}, \quad (4.53)$$

де I_{1H} – номінальне діюче значення основної (першої) гармоніки статорного струму;

σ_H – коефіцієнт зв'язку ротору, що розраховується з формули:

$$\sigma_H = \frac{x_m}{x_m + x_2'}, \quad (4.54)$$

в якій x_m та x_2' – параметри “Т-образної” схеми заміщення АД, що відповідають номінальній частоті статорної напруги.

Представлене в (4.53) значення втрат потужності $\Delta P_{B.G}$ відповідає втратам в АД від вищих гармонік струму при живленні його від статичного перетворювача частоти на основі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією (АІН-ШІМ), який знайшов у теперішній час найбільше застосування на практиці. Нижній і верхній межі значень в (4.53) відносяться до частотно-регулюємих АД відповідно малої (до 3кВт) і великої (вище 100кВт) номінальної потужності.

Загальні втрати потужності $\Delta P_{ПЧ}$ в статичному перетворювачі частоти, який створено на основі АІН-ШІМ, аналогічно (4.40) складаються з постійної $\Delta P_{пост.ПЧ}$ та змінної $\Delta P_{змін.ПЧ}$ складових:

$$\Delta P_{ПЧ} = \Delta P_{пост.ПЧ} + \Delta P_{змін.ПЧ}, \quad (4.55)$$

де постійна складова $\Delta P_{пост.ПЧ}$ розраховується з залежності (4.41), а змінна складова – з виразу:

$$\Delta P_{змін.ПЧ} \approx (\Delta P_{ДР.Н} + \Delta P_{ОШ.Н}) \left(\frac{M\omega}{P_{2H}} \right)^2 + \Delta P_{ВВ.Н} \left(\frac{M\omega}{P_{2H}} \right) + \Delta P_{ВІ.Н} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right). \quad (4.56)$$

В залежностях (4.55) та (4.56) використовуються наступні позначення:

$\Delta P_{ДР.Н}$ – втрати потужності в згладжуючому дроселі та струмообмежуючих реакторах перетворювача частоти при номінальній вихідній корисній потужності двигуна

$\Delta P_{ОШ.Н}$ – номінальне значення втрат потужності в ошиновці трифазного статичного перетворювача частоти (що відповідає номінальним діючим значенням його вихідних фазних напруги $U_{ПЧ.Н}$ та струму $I_{ПЧ.Н}$), які визначаються з залежності:

$$\Delta P_{ОШ.Н} \approx 0,03(U_{ПЧ.Н} \cdot I_{ПЧ.Н}); \quad (4.57)$$

$\Delta P_{ВВ.Н}$ та $\Delta P_{ВІ.Н}$ – номінальні значення (що відповідають номінальній корисній потужності P_{2H} двигуна) втрат потужності у вентилях (діодах, IGBT-транзисторах або тиристорах, що замикаються) відповідно випрямляча і інвертора, що входять до складу перетворювача частоти;

P_{2H} та I_{1H} – номінальні значення відповідно вихідної (корисної) потужності і основної гармоніки фазного статорного струму двигуна;

M , ω та I_1 – фактичні значення відповідно електромагнітного моменту, швидкості і діючого значення основної гармоніки фазного статорного струму двигуна.

4.1.6 Втрати енергії в динамічних режимах нерегульованих за швидкістю електроприводів

Виконаємо аналіз на прикладі електропривода постійного струму з ДПС незалежного збудження, в якому втрати потужності в ланцюгу якоря цього

двигуна можуть бути визначені при динамічних режимах (розгону і гальмуванні) з залежності:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} - M \omega, \quad (4.58)$$

де

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} - \quad (4.59)$$

потужність двигуна, що споживається з електричної мережі (без врахування втрат потужності в обмотці збудження);

$$P_2 = M \omega - \quad (4.60)$$

корисна механічна потужність на валу двигуна.

Для ДПС незалежного збудження справедливі залежності:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = c \Phi \omega_o, \\ I_{\text{я}} = M / c \Phi \end{cases}, \quad (4.61)$$

де ω_o – основна швидкість двигуна;

Φ – магнітний потік ($\Phi = \text{const}$);

c – конструктивна постійна двигуна.

З врахуванням (4.61) змінна складова втрат енергії двигуна в динамічних режимах за довільний час t знаходиться з залежності:

$$\Delta W = \int_0^t \Delta P_{\text{змін}} dt = \int_0^t (M \omega_o - M \omega) dt = \int_0^t M (\omega_o - \omega) dt, \quad (4.62)$$

де $\Delta P_{\text{змін}}$ – змінна складова втрат потужності ДПС незалежного збудження.

З основного рівняння руху електропривода (1.10) визначимо диференціал dt за часом у вигляді:

$$dt = \frac{J d\omega}{M - M_c}, \quad (4.63)$$

де M та M_c – відповідно електромагнітний момент двигуна і статичний момент привода;

J – приведений момент інерції привода.

Підставивши значення dt з (4.63) в залежність (4.62) та, вважаючи, що швидкість двигуна ω в динамічному режимі змінюється від $\omega_{\text{поч}}$ до $\omega_{\text{кін}}$, отримаємо загальний вираз для розрахунку втрат енергії ΔW двигуна в динамічному режимі:

$$\Delta W_{\text{змін}} = J \int_{\omega_{\text{поч}}}^{\omega_{\text{кін}}} (\omega_o - \omega) \frac{M}{M - M_c} d\omega, \quad (4.64)$$

в якому надалі будемо вважати приведені значення моменту інерції привода постійним ($J = \text{const}$)/

На першому етапі аналізу розглянемо окремий випадок пуску двигуна без навантаження (тобто при $M_c = 0$) від нульової початкової швидкості $\omega_{\text{поч}} = 0$ до кінцевої швидкості, що дорівнює основній: $\omega_{\text{кін}} = \omega_o$. З врахуванням цього

визначимо з (4.64) змінні втрати енергії $\Delta W_{\text{змін.П}}$ двигуна при пуску без навантаження у вигляді:

$$\Delta W_{\text{змін.П}}^O = J \int_0^{\omega_o} (\omega_o - \omega) d\omega = J\omega_o^2 - J \frac{\omega_o^2}{2} = J \frac{\omega_o^2}{2}, \quad (4.65)$$

де індекс “о” зверху – тут і далі вказує на те, що розглядаються втрати в двигуні без навантаження (при $M_c = 0$).

З аналізу виразу (4.65) випливає, що при релейно-контакторному пуску без навантаження ДПС незалежного збудження споживає з електричної мережі загальну енергію $W_{\Sigma} = J\omega_o^2$, оскільки половина з цієї енергії $W_{\text{кін}} = J \frac{\omega_o^2}{2}$ витрачається на створення кінетичної енергії привода, а інша половина – $\Delta W_{\text{змін.П}}^O = J\omega_o^2$, з якої половина енергії витрачається на створення кінетичної енергії привода $W_{\text{кін}} = 0,5J\omega_o^2$, а друга половина $\Delta W_{\text{змін.П}} = 0,5J\omega_o^2$ – втрачається в опорі якірної обмотки та в пускових додаткових резисторах (основна частина – в пускових резисторах):

$$W_{\text{змін.П}}^O = W_{\text{кін}} + \Delta W_{\text{змін.П}}^O = J \frac{\omega_o^2}{2} + J \frac{\omega_o^2}{2} = J\omega_o^2. \quad (4.66)$$

Розглянемо *режим динамічного гальмування* ДПС незалежного збудження без навантаження. Для цього режиму з врахуванням загального співвідношення (4.64) визначимо змінні втрати енергії $\Delta W_{\text{змін.ДГ}}^O$ при гальмуванні двигуна до повної зупинки:

$$W_{\text{змін.ДГ}}^O = J \int_{\omega_o}^0 (0 - \omega) d\omega = J \frac{\omega_o^2}{2}, \quad (4.67)$$

де ω_o – швидкість двигуна без навантаження (при $M_c = 0$) перед початком гальмування;

$\omega_{\text{кін}} = 0$ – значення кінцевої швидкості при динамічному гальмуванні.

Аналіз залежності (4.67) свідчить про те, що змінні втрати енергії в двигуні і гальмівному резисторі при динамічному гальмуванні дорівнюють кінетичній енергії привода перед початком гальмування: $\Delta W_{\text{змін.ДГ}}^O = W_{\text{кін}} = 0,5J\omega_o^2$.

Розглянемо *режим гальмування противвімкненням* (ГПВ) для ДПС незалежного збудження. При цьому режимі, як відомо, на якорі двигуна змінюється полярність напруги. З врахуванням цього для визначення змінних втрат енергії в режимі ГПВ потрібно в загальний вираз (4.64) підставити основну швидкість з протилежним знаком ($-\omega_o$). В цьому випадку після такої підстановки для режиму гальмування без навантаження ($M_c = 0$) при $\omega_{\text{поч}} = \omega_o$ і $\omega_{\text{кін}} = 0$ отримаємо:

$$\Delta W_{\text{змін.ГПВ}}^O = J \int_{+\omega_o}^0 (-\omega_o - \omega) d\omega = J \int_0^{\omega_o} (\omega_o + \omega) d\omega = J\omega_o^2 + J \frac{\omega_o^2}{2} = 3J \frac{\omega_o^2}{2}. \quad (4.68)$$

З аналізу (4.68) випливає, що змінні втрати енергії ненавантаженого ДПС незалежного збудження в режимі ГПВ дорівнюють потрібному запасу кінетичної енергії привода: $\Delta W_{\text{змін. ГПВ}}^O = 3W_{\text{кін}} = 1,5J\omega_0^2$.

Розглянемо *режим релейно-контакторного реверсу* ДПС незалежного збудження без навантаження. В цьому випадку загальні втрати енергії при реверсі (зміні швидкості на протилежну за полярністю) дорівнюють сумі змінних втрат енергії $\Delta W_{\text{змін. ГПВ}}^O$ при режимі ГПВ і втрат енергії $\Delta W_{\text{змін. П}}^O$ при пуску двигуна (в зворотну сторону):

$$\Delta W_{\text{змін. рев}}^O = \Delta W_{\text{змін. ГПВ}}^O + \Delta W_{\text{змін. П}}^O = 3J \frac{\omega_0^2}{2} + J \frac{\omega_0^2}{2} = 4J \frac{\omega_0^2}{2}, \quad (4.69)$$

З кінцевого виразу в (4.69) випливає, що втрати енергії при релейно-контакторному способі реверсу ДПС незалежного збудження (без навантаження) дорівнюють збільшеному у четверо запасу кінетичної енергії привода: $\Delta W_{\text{змін. рев}}^O = 4W_{\text{кін}} = 2J\omega_0^2$.

Звернемо увагу на те, що аналогічним образом (як для ДПС незалежного збудження) можуть бути отримані аналітичні залежності для змінних втрат енергії в динамічних режимах без навантаження стосовно до асинхронних двигунів з короткозамкненим і фазним ротором (при відсутності в ланцюзі ротору останнього додаткових резисторів $R_{\text{доп}}$). Ці залежності при роботі двигуна без навантаження мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\text{змін. П}}^O &= J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \\ \Delta W_{\text{змін. ДГ}}^O &= J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \\ \Delta W_{\text{змін. ГПВ}}^O &= 3J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \\ \Delta W_{\text{змін. рев}}^O &= 4J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4.70)$$

де $\Delta W_{\text{змін. П}}^O$ – втрати енергії при релейно-контакторному пуску АД;

$\Delta W_{\text{змін. ДГ}}^O$ – втрати енергії при динамічному гальмуванні АД;

$\Delta W_{\text{змін. ГПВ}}^O$ – втрати енергії при гальмуванні АД противімкненням;

$\Delta W_{\text{змін. рев}}^O$ – втрати енергії при реверсі швидкості АД;

ω_0 – основне значення швидкості АД, що визначається з (3.1);

R_1 та R_2' – параметри схеми заміщення АД (відповідно активні опори статорної обмотки і роторної обмотки, що приведені до статору);

J – приведений момент інерції привода.

Схожий вигляд мають аналітичні залежності для розрахунку змінних втрат енергії в динамічних режимах для АД з фазним ротором, який працює без навантаження та в ланцюг ротору якого введені додаткові резистори $R_{\text{доп}}$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\text{змін.П}}^O &= J \frac{\omega_O^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right), \\ \Delta W_{\text{змін.ДГ}}^O &= 3I_{\text{екв}}^2 R_1 t_{\text{ДГ}} + J \frac{\omega_O^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right), \\ \Delta W_{\text{змін.ГПВ}}^O &= 3J \frac{\omega_O^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right), \\ \Delta W_{\text{змін.рев}}^O &= 4J \frac{\omega_O^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right) \end{aligned} \right\} - \quad (4.71)$$

для сумарних втрат енергії в асинхронному електроприводі (в двигуні і додаткових резисторах в роторі) або

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\text{змін.П}}^O &= J \frac{\omega_O^2}{2} \left(\frac{R_1 + R'_2}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right), \\ \Delta W_{\text{змін.ДГ}}^O &= 3I_{\text{екв}}^2 R_1 t_{\text{ДГ}} + J \frac{\omega_O^2}{2} \left(\frac{R_1 + R'_2}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right), \\ \Delta W_{\text{змін.ГПВ}}^O &= 3J \frac{\omega_O^2}{2} \left(\frac{R_1 + R'_2}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right), \\ \Delta W_{\text{змін.рев}}^O &= 4J \frac{\omega_O^2}{2} \left(\frac{R_1 + R'_2}{R'_2 + R'_{\text{доод}}} \right) \end{aligned} \right\} - \quad (4.72)$$

для втрат енергії в АД з фазним ротором (де $R'_{\text{доод}}$ – значення опору додаткового резистора $R_{\text{доод}}$, що приведене до статора; $t_{\text{ДГ}}$ – тривалість часу режиму динамічного гальмування).

На другому етапі аналізу з врахуванням співвідношення (4.64) приведемо аналітичні залежності для розрахунку змінних втрат енергії в динамічних режимах (при пуску, динамічному гальмуванні, гальмуванні противвімкненням й реверсі) для нерегульованих електроприводів (двигунів) постійного і змінного струму при релейно-контакторному керуванні і наявності навантаження (тобто при $M_C \neq 0$) на валу двигуна:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\text{змін.П}} &= \left(\frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} - M_C} \right) \Delta W_{\text{змін.П}}^O, \\ \Delta W_{\text{змін.ДГ}} &= \left(\frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} + M_C} \right) \Delta W_{\text{змін.ДГ}}^O, \\ \Delta W_{\text{змін.ГПВ}} &= \left(\frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} + M_C} \right) \Delta W_{\text{змін.ГПВ}}^O, \\ \Delta W_{\text{змін.рев}} &= W_{\text{змін.ГПВ}} + \Delta W_{\text{змін.П}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.73)$$

де $M_{\text{ср}}$ – середнє значення електромагнітного моменту двигуна в конкретному динамічному режимі.

При цьому середнє значення пускового електромагнітного моменту двигуна при релейно-контакторному пуску може бути наближено визначено з залежностей:

$$M_{cp} \approx 0,5(M_1 + M_{\max}) - \quad (4.74)$$

для ДПС незалежного збудження;

$$M_{cp} \approx 0,5(M_{II} + M_K) - \quad (4.75)$$

для короткозамкненого АД;

$$M_{cp} \approx 0,5(M_1 + M_K) - \quad (4.76)$$

для АД з фазним ротором (з додатковими резисторами, що вводяться в ланцюг ротору при пуску).

В залежностях (4.74) – (4.76) прийняті наступні позначення:

M_1 та M_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне значення пускового електромагнітного моменту двигуна постійного струму;

M_{II} та M_K – відповідно пускове й критичне значення електромагнітного моменту короткозамкненого АД;

M_1 та M_K – відповідно мінімальне пускове й критичне значення електромагнітного моменту АД з фазним ротором (при введенні додаткових резисторів в ланцюг ротору при пуску).

З врахуванням формули (1.48) і співвідношень (4.74) – (4.76) наближені значення часу пуску t_{II} , гальмування t_{Γ} й реверсу t_p нерегульованих ЕП з релейно-контакторним керуванням знаходяться з залежностей:

$$\left. \begin{aligned} t_{II} &\approx \frac{J\omega_{CT}}{M_{cp} - M_C}, \\ t_{\Gamma} &\approx \frac{J\omega_{CT}}{M_{cp} + M_C}, \\ t_{rev} &\approx t_{II} + t_{\Gamma} \end{aligned} \right\}, \quad (4.77)$$

де ω_{CT} – стале значення швидкості.

Загальні втрати енергії при динамічних режимах для нерегульованих електроприводів постійного і змінного струму складаються з змінної й постійної складових:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{II} &= \Delta W_{пост. II} + \Delta W_{змін. II}, \\ \Delta W_{ДГ} &= \Delta W_{пост. ДГ} + \Delta W_{змін. ДГ}, \\ \Delta W_{ГПВ} &= \Delta W_{пост. ГПВ} + \Delta W_{змін. ГПВ}, \\ \Delta W_{рев} &= \Delta W_{пост. рев} + \Delta W_{змін. рев} \end{aligned} \right\}, \quad (4.78)$$

де постійні складові відповідних динамічних втрат знаходяться з залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\text{пост.}\Pi} &\approx \Delta P_{O3} t_{\Pi} + \frac{1}{3} (\Delta P_{MX.H} + \Delta P_{C.H}) t_{\Pi}, \\ \Delta W_{\text{пост.}\Delta\Gamma} &= \Delta P_{O3} t_{\Gamma}, \\ \Delta W_{\text{пост.}\Gamma\Pi\text{В}} &\approx \Delta P_{O3} t_{\Gamma} + \frac{1}{3} (\Delta P_{MX.H} + \Delta P_{C.H}) t_{\Gamma}, \\ \Delta W_{\text{пост.}\text{рев}} &\approx \Delta W_{\text{пост.}\Gamma\Pi\text{В}} + \Delta W_{\text{пост.}\Pi} \end{aligned} \right\} - \quad (4.79)$$

для ДПС незалежного збудження або

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\text{пост.}\Pi} &= \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2 \left[\frac{3}{2} \Delta P_{C1.H} + 3 I_{mH}^2 R_1 \right] t_{\Pi} + \frac{1}{3} \Delta P_{MX.H} t_{\Pi}, \\ \Delta W_{\text{пост.}\Delta\Gamma} &= 3 I_{\text{екв}}^2 R_1 t_{\Gamma}, \\ \Delta W_{\text{пост.}\Gamma\Pi\text{В}} &= \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2 \left[\frac{5}{2} \Delta P_{C1.H} + 3 I_{mH}^2 R_1 \right] t_{\Gamma} + \frac{1}{3} \Delta P_{MX.H} t_{\Gamma}, \\ \Delta W_{\text{пост.}\text{рев}} &= \Delta W_{\text{пост.}\Gamma\Pi\text{В}} + \Delta W_{\text{пост.}\Pi} \end{aligned} \right\} - \quad (4.80)$$

для асинхронного двигуна.

В залежностях (4.79) і (4.80) використовуються наступні позначення:

$\Delta P_{MX.H}$ та $\Delta P_{C.H}$ – номінальні значення відповідно механічних втрат потужності і втрат потужності в сталі двигуна;

ΔP_{O3} – втрати потужності в обмотці збудження;

$\Delta P_{C1.H}$ – номінальні втрати потужності в сталі АД;

U_1 та U_{1H} – відповідно фактичне і номінальне діючі фазні значення статорної напруги АД;

I_{mH} та R_1 – відповідно номінальне значення струму намагнічування і активний опір фазної статорної обмотки АД;

$I_{\text{екв}}$ – еквівалентне значення статорного струму АД при динамічному гальмуванні;

t_{Π} та t_{Γ} – значення тривалості часу динамічних режимів (відповідно пуску і гальмування);

Наближені залежності (4.79) і (4.80) отриманні при припущеннях о лінійному характері зміни швидкості двигуна у всіх динамічних режимах, а також з врахуванням апроксимації у співвідношенні (4.44) показника при ковзанні s одиницею (замість 1,3).

4.1.7 Втрати енергії в динамічних режимах регульованих за швидкістю електроприводів

Під динамічними режимами в таких електроприводах будемо розуміти режими, що пов'язані з зміною електромагнітного моменту M і швидкості ω двигуна (наприклад, збільшення або зменшення статичного моменту, збільшення або зменшення швидкості, в тому числі пуск або гальмування до заданої швидкості, реверс швидкості).

Для визначення втрат енергії в кожному окремому зі згаданих динамічних режимів необхідно:

1) виходячи з заданих графіків зміни швидкості $\omega(t)$ і статичного моменту $M_c(t)$ привода в розглядуваному динамічному режимі з тривалістю $t_{\partial.p}$ (де $0 \leq t \leq t_{\partial.p}$), розрахувати графік зміни електромагнітного моменту $M(t)$ двигуна з залежності:

$$M(t) = M_c(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (4.81)$$

де J – приведений момент інерції привода;

2) обчислити (на протязі тривалості $t_{\partial.p}$ розглядуваного динамічного режиму) з формули:

$$Y_{екв} = \left[\frac{1}{t_{\partial.p}} \int_0^{t_{\partial.p}} Y^2(t) dt \right]^{1/2}, \quad (4.82)$$

еквівалентні (середньоквадратичні) значення якірного струму $I_{я.екв}$ (для ДПС незалежного збудження) або електромагнітного моменту $M_{екв}$ (для асинхронних двигунів), де $Y(t)$ – часова залежність згаданих вище параметрів від часу t в цьому динамічному режимі;

3) обчислити з тієї ж залежності (4.82) еквівалентне (середньоквадратичне) значення швидкості $\omega_{екв}$ двигуна в розглядуваному динамічному режимі (для всіх типів двигунів), а також з врахуванням цього значення розрахувати з (3.29) відповідне йому значення еквівалентного ковзання $s_{екв}$ (для асинхронних двигунів);

4) підставивши отримані еквівалентні значення параметрів двигуна (замість однойменних параметрів двигуна) в отримані раніше в п.4.1.4 та п.4.1.5 аналітичні залежності для втрат потужності регульованих за швидкістю електродвигунів й електроприводів в сталих режимах, розрахувати середні значення постійної і змінної складових втрат потужності, загальних втрат потужності в двигуні і електроприводі;

5) через знайдені середні значення втрат потужності в динамічному режимі визначити постійну $\Delta W_{пост}$ і змінну $\Delta W_{змін}$ складові втрат енергії, загальні втрати енергії в двигуні ΔW й електроприводі $\Delta W_{ЕП}$ в розглядуваному динамічному режимі з залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{пост} &= \Delta P_{пост} t_{\partial.p}, \\ \Delta W_{змін} &= \Delta P_{змін} t_{\partial.p}, \\ \Delta W &= \Delta P t_{\partial.p}, \\ \Delta W_{ЕП} &= \Delta P_{ЕП} t_{\partial.p} \end{aligned} \right\}, \quad (4.83)$$

де $\Delta P_{пост}$ та $\Delta P_{змін}$ – розраховані через еквівалентні значення параметрів двигуна середні значення відповідно постійної і змінної складових втрат потужності двигуна;

ΔP та ΔP_{EP} – обчислені через еквівалентні значення параметрів двигуна середні значення загальних втрат потужності відповідно в двигуні і електроприводі;

$t_{d.p}$ – тривалість динамічного режиму.

Контрольні питання

1. Розрахункові залежності для коефіцієнта корисної дії (ККД) електроприводів, що працюють в сталих і динамічних режимах, а також – для номінального значення ККД електропривода.

2. Розрахунок втрат потужності (загальних, постійних і змінних) для нерегульованого електропривода постійного струму, що працює в сталому режимі на природній механічній характеристиці двигуна.

3. Розрахунок втрат потужності (загальних, постійних і змінних) для нерегульованого асинхронного електропривода, що працює в сталому режимі на природній механічній характеристиці двигуна.

4. Розрахунок втрат потужності (загальних, постійних і змінних) для нерегульованого синхронного електропривода, що працює в сталому режимі на природній механічній характеристиці двигуна.

5. Розрахунок втрат потужності (загальних, постійних і змінних) в сталому режимі для нерегульованого за швидкістю двигуна постійного струму.

6. Розрахунок загальних втрат потужності в сталому режимі роботи для тиристорного електропривода постійного струму (з них більш докладніше – загальні, постійні і змінні втрати потужності в тиристорному перетворювачі).

7. Розрахунок загальних, постійних і змінних втрат потужності в сталому режимі для асинхронного двигуна з фазним ротором, в ланцюг якого введені додаткові резистори.

8. Розрахунок загальних, постійних і змінних втрат потужності в сталому режимі для статичного перетворювача частоти (створеного на основі АІН-ШІМ).

9. Розрахунок загальних, постійних і змінних втрат потужності в сталому режимі для частотно-керованого асинхронного двигуна.

10. Розрахунок змінних втрат енергії в динамічних режимах (при пуску, реверсі, гальмуванні противвімкненням і динамічному гальмуванні) нерегульованих електроприводів постійного струму, що працюють без навантаження.

11. Розрахунок змінних втрат енергії в динамічних режимах (при пуску, реверсі, гальмуванні противвімкненням і динамічному гальмуванні) нерегульованих асинхронних електроприводів, що працюють без навантаження.

12. Розрахунок змінних втрат енергії в динамічних режимах (при пуску, реверсі, гальмуванні противвімкненням і динамічному гальмуванні)

нерегульованих електроприводів постійного струму, що працюють з навантаженням.

13. Розрахунок загальних, постійних і змінних втрат енергії в динамічних режимах регульованих за швидкістю електроприводів

4.2 Вибір типу електродвигуна, розрахунок його потужності і перевірка на нагрів

4.2.1 Вибір типу електродвигуна

Вибір двигуна для електропривода виконується за наступними основними параметрами:

- роду струму (постійний або змінний) і за номінальним значенням напруги;
- за номінальною швидкістю;
- за номінальною потужністю;
- за конструктивним виконанням (з горизонтальним або вертикальним розташуванням валу, за умовами захисту від впливу навколишнього середовища і виду вентиляції);
- за тривалістю включення.

Двигуни постійного струму виконуються на номінальні значення постійної напруги, що дорівнюють 220, 440, 600, 800 та 1000В, а двигуни змінної напруги – на номінальну частоту 50 (або 60) Гц і номінальні значення напруги, що дорівнюють 220, 380, 660, 3000, 6000В. Номінальні значення швидкості загальнопромислових електродвигунів постійного і змінного струму лежать в діапазоні від 250 до 3000 об/хв, а номінальні значення потужності – від часток кіловата до 2500 кВт і вище. При цьому ряд двигунів, що випускається, розрахований на збільшення (за рахунок ослаблення магнітного потоку) їх швидкості в (1,5–3) рази вище від номінального значення швидкості.

За ступенем захисту від впливу навколишнього середовища розрізняють відкрите, закрите (в тому числі герметичне) і захищене (в тому числі краплезахищене, брызкозахищене і вибухозахищене) виконання електродвигунів.

У *відкритих двигунах* відсутні захисні приладдя, що перешкоджають потраплянню невеликих сторонніх часток до внутрішніх струмопровідних частин двигуна.

У *захищених двигунах* містяться спеціальні приладдя (у вигляді коробів, решіток і сіток), що запобігають потраплянню в середину двигуна невеликих сторонніх часток. *Краплезахищені* двигуни мають приладдя, що запобігають потраплянню всередину двигуна крапель, що падають прямовисно або під кутом не більше 60° до вертикалі, а *брызкозахищені* двигуни виключають потрапляння в середину двигуна брызок будь-якого напрямку. При цьому в середину всіх захищених двигунів відбувається потрапляння навколишнього повітря, внаслідок чого в захищені, краплезахищені і брызкозахищені двигуни відбувається попадання пилу, вологи і парів разом з навколишнім повітрям.

Вибухозахищені двигуни забезпечуються спеціальним кожухом, який витримує без пошкодження вибух в середині двигуна і запобігає розповсюдженню полум'я або іскр до навколишнього середовища.

Закриті двигуни не мають спеціальних отворів для обміну повітрям між двигуном та навколишнім середовищем. Незначний обмін повітрям відбувається тільки за рахунок нещільностей у з'єднанні деталей двигуна. З збільшенням ступеня герметизації двигунів збільшується їх маса і вартість (внаслідок встановлення додаткового захисного приладдя).

У *герметичних* двигунів всі отвори і з'єднання закриті та ущільнені настільки ретельно, що виключається будь-яке сполучення між внутрішнім простором машини і зовнішнім газовим середовищем або рідиною. Герметична машина може працювати зануреною у воду.

Від правильного конструктивного вибору двигуна залежить його надійність і довговічність роботи. Рекомендації по вибору конструктивного виконання двигуна представлені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

Рекомендації по вибору конструктивного виконання електродвигуна

№	Навколишнє середовище для двигуна	Рекомендоване виконання двигуна
1	Сухі приміщення без пилу, бруду і хімічно агресивних газів	Відкрите або захищене
2	Пильне або вологе приміщення	Закрите
3	Приміщення з високою температурою	Закрите з незалежною вентиляцією
4	Приміщення з високою вологістю або які містять агресивні гази	Закрите або герметичне
5	Вибухонебезпечні приміщення	Вибухозахищене
6	Відкрите повітря	Закрите або захищене

При виборі конструктивного виконання електродвигуна також важливим є вибір системи вентиляції. Існуючі електродвигуни виконуються з природною вентиляцією, самовентиляцією і незалежною вентиляцією. При природній вентиляції двигуни не мають будь-яких спеціальних пристроїв для охолодження. У двигунів з самовентиляцією охолодження здійснюється вентилятором, який встановлено на вал двигуна. Причому при закритому виконанні вентилятор встановлюється зовні під ковпаком (який має наскрізні отвори) і обдуває ребристу зовнішню поверхню двигуна (такі двигуни називаються такими, що обдуваються). Важною особливістю двигунів з природньою вентиляцією і самовентиляцією є залежність інтенсивності їх охолодження від швидкості обертання валу двигуна (при зменшенні швидкості погіршується охолодження).

Охолодження двигунів з незалежною вентиляцією відбувається за допомогою спеціального вентилятора, що приводиться у рух окремим

(додатковим) електродвигуном. Використання незалежної вентиляції дозволяє трохи підвищити навантаження основного двигуна особливо при зменшенні його швидкості від номінального значення.

Для повторно-короткочасних режимів роботи електропривода, що характеризуються при номінальній швидкості двигуна графіком зміни на рис.4.1 корисною механічною потужністю P_2 на валу двигуна, випускаються спеціальні двигуни з різними значеннями номінальної тривалості включення ($ПВ_H$) згідно наступного ряду:

$$ПВ_H = 15\%, 25\%, 40\%, 60\% \text{ і } 100\% \quad (4.84)$$

(де останнє значення відповідає, вочевидь, тривалому режиму роботи двигуна). При цьому всі ці двигуни зберігають основні технічні характеристики (номінальні значення моменту, швидкості, кратностей максимального і критичного моментів, ідентичне конструктивне виконання), але відрізняються при значеннях $ПВ_H$ менше 100% від двигунів тривалого режиму роботи тільки застосованим в них зменшеним температурним класом ізоляційних матеріалів. З врахуванням цього двигуни з $ПВ < 100\%$ забезпечують свою нормальну (без перегріву) роботу при номінальному значенні корисної потужності P_{2H} двигуна тільки за умови не перевищення фактичної тривалості включення ($ПВ$) привода (двигуна) номінального значення тривалості включення ($ПВ_H$) цього двигуна:

$$ПВ \leq ПВ_H \quad (4.85)$$

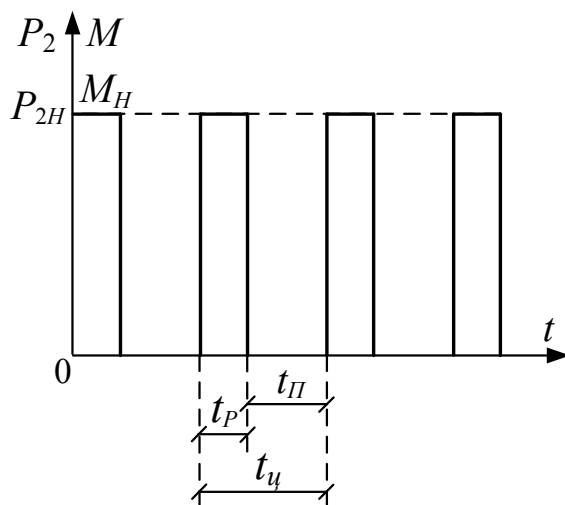


Рис.4.1 Графік зміни вихідної корисної потужності привода (двигуна) при повторно-короткочасному навантаженні (P_{2H} та M_H — номінальні значення відповідно корисної механічної потужності і обертового моменту двигуна)

При цьому (з врахуванням позначень, що використовуються на рис.4.1) розрахунок фактичної тривалості включення привода здійснюється з залежності:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_{п}} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\%, \quad (4.86)$$

де t_p та t_{Π} – час відповідно роботи і паузи привода;

$t_{\text{ц}} = t_p + t_{\Pi}$ – час циклу, що повторюється.

Для розглянутих вище повторно-короткочасних навантажень час роботи t_p двигуна не повинен перевищувати 10 хв. (інакше це навантаження прийнято відносити до тривалого навантаження).

Припустимий нагрів двигунів визначається нагрівостійкістю застосованих в них ізоляційних матеріалів, які поділяються на шість класів: А, Е, В, F, Н та G з гранично припустимою температурою від 105 до 175° С. Перевищення зазначених температур не припустиме, оскільки це веде до руйнування ізоляції та скороченню строку служби двигунів.

При цьому номінальна потужність двигуна (що зазначена на його щитку або в довідковій літературі) відповідає температурі навколишнього середовища, що дорівнює +40° С. При значно більш низькій температурі навколишнього середовища двигун може бути навантажений трішки вище номінальної потужності, а при більш високій температурі навколишнього середовища навантаження двигуна слід зменшувати або застосовувати спеціальні міри (наприклад, незалежну вентиляцію для підвищення інтенсивності його охолодження).

Вибір номінального значення n_H швидкості двигуна виконується у відповідності з потрібною номінальною кутовою частотою обертання $n_{M.H}$ робочого механізму (або машини), що приводиться у рух:

$$n_H \left[\frac{\text{об}}{\text{хв}} \right] \approx i_{\Pi} n_{M.H} \left[\frac{\text{об}}{\text{хв}} \right], \quad (4.87)$$

де i_{Π} – передавальне число передавального пристрою (редуктору; ремінної, ланцюгової або рейкової передачі)

4.2.2 Розрахунок потужності і перевірка на нагрів двигунів, що працюють в сталих режимах з швидкістю, близькою до номінальної

Електроприводи з зазначеними режимами роботи двигунів характеризуються тим, що в них двигуни основну частину часу працюють у сталих режимах, а режими розгону і гальмування відбуваються дуже рідко – наприклад, декілька раз в робочу зміну (що дозволяє при виборі потужності двигуна знехтувати втратами енергії в пускогальмівних режимах двигуна). Такого виду електроприводи поділяються на три групи:

- з постійним тривалим навантаженням (наприклад, відцентрові насоси і вентилятори, тривало включені при незмінних умовах роботи, папероворобні машини та ін.);
- з змінним тривалим навантаженням (наприклад, транспортери, конвеєри та ін.);
- з повторно-короткочасним навантаженням (наприклад, металорізальні станки).

Розглянемо електроприводи, що працюють з *постійним тривалим навантаженням*, яким відповідає тахограма $\omega(t)$ двигуна, навантажувальна діаграма $M_i(t)$, середній динамічний момент приводу $M_{\text{дин}}$ і електромагнітний момент $M(t)$ двигуна, що показані на рис.4.2. В цих електроприводах час сталого режиму роботи t_C складає багато більше часу розгону t_P і гальмування t_Γ (тобто $t_C \gg t_P, t_\Gamma$).

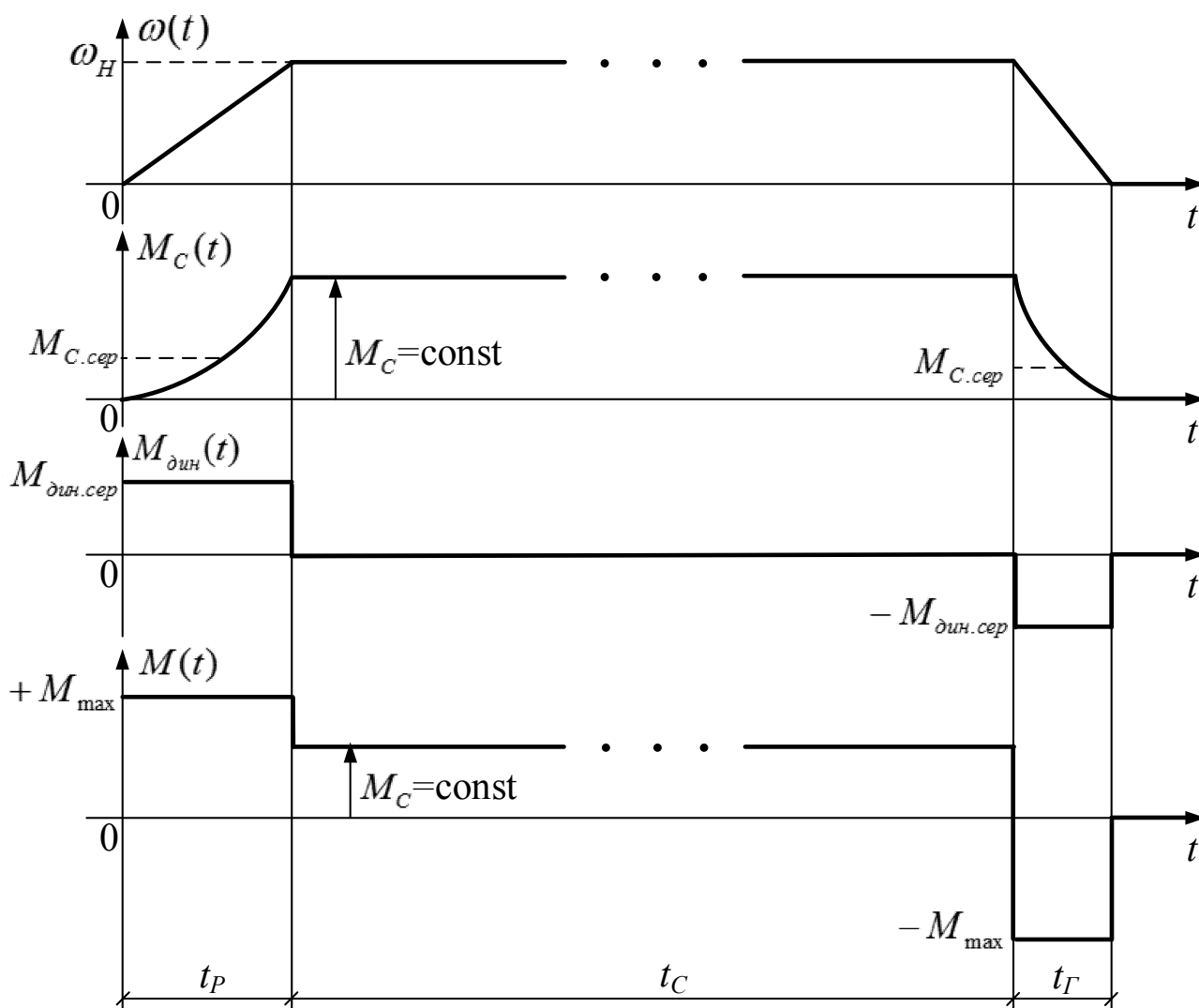


Рис.4.2 Часові діаграми швидкості $\omega(t)$, статичного $M_C(t)$ і середнього динамічного $M_{\text{дин}}(t)$ моменту приводу та електромагнітного моменту $M(t)$ двигуна для тривалого постійного навантаження

Розрахунок і вибір (з довідкової літератури) номінальної потужності P_{2H} двигуна, що працює з постійним тривалим навантаженням, здійснюється з залежності:

$$P_{2H} \geq M_C \omega_H, \quad (4.88)$$

де $M_C = \text{const}$ – найбільше можливе значення постійного статичного моменту приводу в сталому режимі;

ω_H – номінальне значення швидкості двигуна.

Розглянемо електроприводи, що працюють з *змінним тривалим навантаженням* у вигляді статичного моменту $M_C(t)$, що показаний на рис.4.3,а для сталого режиму швидкості: $\omega \approx \omega_H$. Стосовно до цих приводів вибирається потужність P_{2H} двигуна (при $ПВ_H = 100\%$) з залежності:

$$P_{2H} \geq \omega_H M_{C.екв}, \quad (4.89)$$

в якій еквівалентне значення $M_{C.екв}$ статичного моменту опору обчислюється у вигляді його середньквдратичного значення (за час тривалості циклу t_y повторення) в сталому режимі:

$$M_{C.екв} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} M_C^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \sum_{i=1}^N M_{Ci}^2 \Delta t_i}, \quad (4.90)$$

де i – номер інтервалу часу, на якому відповідне цьому інтервалу значення статичного моменту M_{Ci} є постійним значенням ($M_{Ci} = \text{const}$);

N – кількість інтервалів часу протягом тривалості циклу повторення t_y .

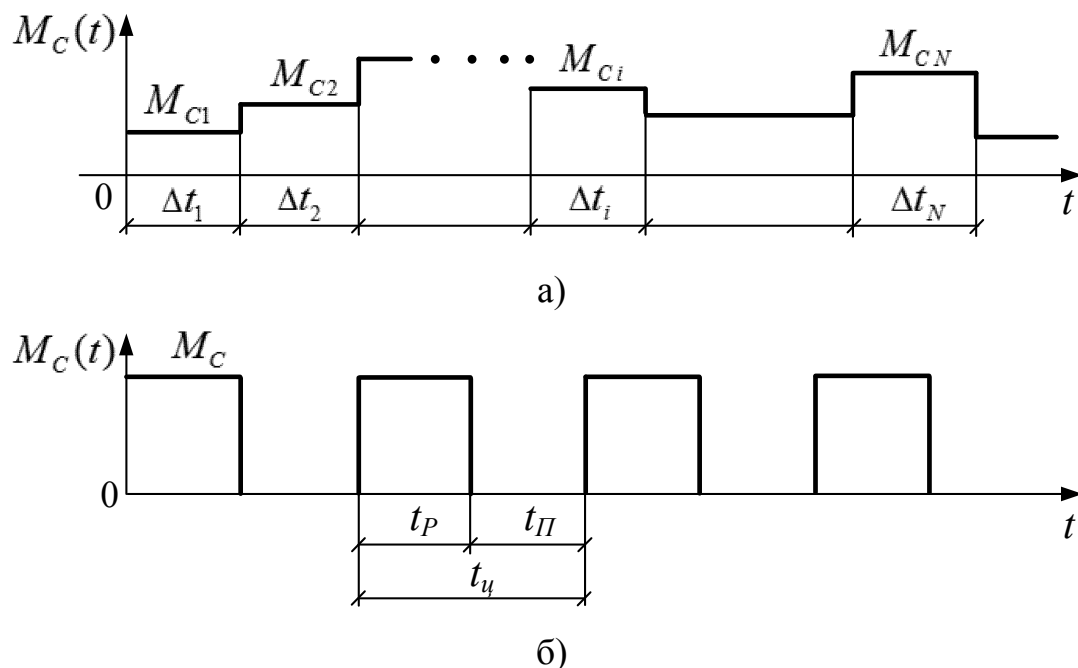


Рис.4.3 Часові діаграми статичного моменту $M_C(t)$ при змінному тривалому (а) і повторно-короткочасному (б) навантаженні

Розглянемо електроприводи, що працюють в сталому режимі з *повторно-короткочасним навантаженням*, який представлено у вигляді графіка статичного моменту $M_C(t)$ на рис.4.3,б. Для електроприводів з повторно-короткочасним навантаженням вибір потужності двигуна здійснюється з залежності (4.88), а номінальне значення тривалості включення $ПВ_H$ двигуна – з врахуванням співвідношень (4.85) і (4.86).

Звернемо увагу на те, що, по-перше, залежності (4.88)-(4.90) можна застосувати як для двигунів постійного, так і – змінного струму. По-друге, для розглядуваних нерегульованих електроприводів (що реалізуються звичайно на практиці з релейно-контакторними режимами пуску і гальмування) необхідно перевірити виконання у режимі пуску наступних умов:

$$M_C < M_{сер} \quad - \quad (4.91)$$

для двигунів постійного струму;

$$M_C < 0,8M_{сер} \quad - \quad (4.92)$$

для АД з фазним ротором (при введенні додаткових резисторів в ланцюг ротору);

$$\left. \begin{array}{l} M_C < 0,8M_K, \\ M_C < 0,8M_\Pi \quad \text{при} \quad \omega = 0 \end{array} \right\} \quad - \quad (4.93)$$

для короткозамкненого АД.

В залежностях (4.91) – (4.93) використовуються наступні позначення

$M_{сер}$ – середнє пускове значення електромагнітного моменту двигуна, що розраховується з (4.74) та (4.76);

M_K та M_Π – відповідно критичне і пускове значення електромагнітного моменту короткозамкненого АД;

0,8 – значення поправного коефіцієнту, що враховує зменшення пускового і критичного значень моменту короткозамкненого АД при просадці (до 90% від номінального значення фазної напруги мережі).

При цьому критичне і максимальне значення моменту короткозамкненого АД знаходяться з залежностей:

$$\left. \begin{array}{l} M_K = \lambda_M M_H, \\ M_\Pi = \lambda_\Pi M_H \end{array} \right\}, \quad (4.94)$$

де λ_M – кратність максимального моменту АД (дорівнює на практиці від 1,8 до 2,2);

λ_Π – кратність пускового моменту АД (дорівнює на практиці від 1,1 до 1,3);

M_H – номінальне значення електромагнітного моменту двигуна.

По-третє, оцінимо з залежності:

$$t_\Gamma \approx \frac{J\omega_H}{M_C} \quad - \quad (4.95)$$

час гальмування до повної зупинки нерегульованого електропривода, що здійснюється шляхом відключення його якірної (для двигуна постійного струму) або статорних обмоток (для двигуна змінного струму) від електричної мережі живлення. Цей вид гальмування називається режимом гальмування на “вибігу”. При цьому гальмуванні електромагнітний момент двигуна дорівнює нулю ($M = 0$), а гальмування привода відбувається під впливом ненульового

статичного реактивного моменту ($M_c \neq 0$), що протидіє напрямку обертання двигуна.

Якщо умови (4.91) – (4.93) не виконуються, то потрібно при виборі двигуна збільшити його номінальну потужність. Якщо ж виявляється неприпустимо великим (за вимогами технології або охорони праці) розраховане з (4.95) час гальмування на “вибігу”, то слід в електроприводі застосувати інший (більш ефективний) спосіб гальмування: динамічне або противвімкненням. Для цих способів час гальмування t_f визначається з перших двох залежностей в (4.77).

Перевірка на нагрів двигунів для електроприводів постійного і змінного струму, що працюють в сталих режимах з швидкістю, близькою до номінальної, здійснюється методом середніх змінних втрат потужності з залежностей:

$$\Delta P_{змін} \leq \Delta P_{змін.H} - \quad (4.96)$$

при постійному тривалому навантаженні;

$$\Delta P_{змін.сер} = \frac{1}{t_{\psi}} \sum_{i=1}^N \Delta P_{змін.i} \cdot \Delta t_i \leq \Delta P_{змін.H} - \quad (4.97)$$

при змінному тривалому навантаженні;

$$\Delta P_{змін} \left(\frac{t_p}{t_p + t_{\Pi}} \right) = \Delta P_{змін} \cdot (ПВ) \leq \Delta P_{змін.H} \cdot (ПВ_H) - \quad (4.98)$$

при повторно-короткочасному навантаженні.

В залежностях (4.96) – (4.98) використовуються наступні позначення:

$\Delta P_{змін}$ – змінні втрати потужності двигуна при тривалому режимі або протягом роботи для повторно-короткочасного режиму;

$\Delta P_{змін.i}$ та $\Delta P_{змін.H}$ – змінні втрати потужності на i -ому інтервалі тривалого змінного навантаження і номінальне значення (для тривалого режиму роботи) змінних втрат потужності двигуна відповідно;

ПВ та ПВ_H – відповідно фактичне і номінальне значення тривалості включення двигуна;

i – номер інтервалу на циклі повторення при тривалому змінному навантаженні;

N – загальна кількість інтервалів на зазначеному циклі повторення;

t_p , t_{Π} та t_{ψ} – відповідно час роботи, паузи і циклу повторення при повторно-короткочасному навантаженні.

Вибір середніх змінних втрат потужності в представленій вище методиці перевірки на нагрів електродвигунів обумовлений тим, що саме змінна складова втрат потужності здійснює на практиці найбільший вплив на нагрів електродвигунів (тому змінні втрати потужності іноді називають “гріючими” двигун втратами).

Причому, якщо двигун не проходить перевірки на нагрів з (4.96) – (4.98), то необхідно вибрати наступний найближчий збільшеної номінальної

потужності двигун і всі раніше проведені перевірки повторити для нього заново.

При цьому звернемо увагу на існуючу прямо пропорційну залежність (4.25) електромагнітного моменту $M(t)$ від якірного струму $I_{\text{я}}(t)$ для ДПС незалежного збудження при роботі з номінальним значенням магнітного потоку ($\Phi = \Phi_H$), а також – на квадратичну залежність (4.14) змінних втрат потужності цього двигуна від струму $I(t)$ якоря. З врахуванням відмічених особливостей стосовно до ДПС незалежного збудження (що працює при швидкості, близької до номінальної, з змінним тривалим або повторно-короткочасним навантаженнями) можуть бути застосовані також інші (еквівалентні розглянутому раніше методу середніх втрат потужності) методи перевірки цього двигуна на нагрів:

а) за еквівалентним моментом $M_{\text{екв}}$ двигуна згідно співвідношення

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} M^2(t) dt} \leq M_H, \quad (4.99)$$

б) за еквівалентним якірним струмом $I_{\text{я екв}}$ двигуна з залежності:

$$I_{\text{я екв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} I_{\text{я}}^2(t) dt} \leq I_{\text{я Н}}, \quad (4.100)$$

де M_H та $I_{\text{я Н}}$ – номінальні значення відповідно електромагнітного моменту і якірного струму ДПС незалежного збудження;

$t_{\text{ц}}$ – час повторення циклу;

На останок приведемо для двигунів (постійного струму та асинхронних), що працюють в тривалому змінному або повторно-короткочасному режимах, аналітичну залежність для їх перевірки на нагрів з довільним номінальним значенням тривалості включення (ПВ_H) двигуна:

$$M_{\text{екв}} \leq M_H \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_H}}, \quad (4.101)$$

де ПВ – фактична тривалість включення двигуна, що розраховується з (4.86).

4.2.3 Розрахунок потужності і перевірка на нагрів регульованих за швидкістю двигунів

В регульованих за швидкістю електроприводах швидкість двигуна може приймати сталі значення, що відрізняються від номінальної швидкості двигуна. Ці сталі значення швидкості можуть бути як нижче, та і вище номінального значення швидкості двигуна. Важливою особливістю сучасних регульованих електроприводів (що створюються для двигунів постійного струму – на основі тиристорного перетворювача постійного струму, а для асинхронних і синхронних двигунів – на основі статичного перетворювача частоти) є можливість плавного регулювання темпу зміни швидкості (при розгоні або

гальмуванні) від одного сталого значення швидкості до її іншого сталого значення.

Розрахунку потужності двигуна в регульованих електроприводах постійного і змінного струму передують графічна побудова (для найбільш напруженого режиму роботи електропривода): тахограми $\omega(t)$ двигуна, навантажувальної діаграми $M_c(t)$, динамічного моменту привода $M_{дин}(t)$ і електромагнітного моменту $M(t)$ двигуна. При цьому тахограма $\omega(t)$ та навантажувальна діаграма $M_c(t)$ задаються умовами потрібного технологічного процесу робочого механізму (що приводиться у рух цим електродвигуном). У якості прикладу на рис.4.4 представлені згадані тахограма $\omega(t)$ і навантажувальна діаграма $M_c(t)$ для двигуна привода переміщення столу поздовжньо-стругального верстату. Цей привод забезпечує циклічний зворотно-поступальний рух (в горизонтальній площині) для зазначеного столу, на якому закріплена деталь, що обробляється. При русі столу в прямому напрямку (на інтервалі часу t_3 з швидкістю ω_p) відбувається зняття стружки з поверхні деталі, що обробляється, нерухомо закріпленим (над столом) різцем. При зворотному русі (з підвищеною швидкістю, що дорівнює номінальній ω_H , на інтервалі t_7) деталь, що обробляється, разом зі столом повертаються у вихідний стан. При цьому на діаграмах на рис.4.4 інтервали t_1 і t_6 відповідають режимам розгону; інтервали t_5 і t_8 – режимам гальмування до нульової швидкості з різних напрямків; інтервал t_6 – розгону в зворотному напрямку до номінальної швидкості ω_H ; інтервали t_2 і t_4 – роботі без різання при швидкості ω'_p (для спрощеного аналізу статичний момент привода, що відповідає роботі без різання, прийнят рівним нулю).

Наведемо нижче методику розрахунку потужності двигуна для регульованих за швидкістю електроприводів:

1) виконаємо попередній розрахунок номінальної потужності P_{2H} двигуна з наступних залежностей:

$$\left. \begin{aligned} P_{2H} &\approx \kappa_{зан} \omega_H M_{C.екв}, \\ \kappa_{зан} &= (1,1 - 1,3) \end{aligned} \right\}, \quad (4.102)$$

$M_{C.екв}$ – еквівалентне значення статичного моменту за час циклу t_u , що визначається з (4.90);

$\kappa_{зан}$ – коефіцієнт запасу;

ω_H – номінальне значення швидкості двигуна;

2) з довідкової літератури вибирається електродвигун найближчої більшої потужності з заданою номінальною швидкістю ω_H , що має потрібне конструктивне виконання і охолодження, що відповідає навколишньому середовищу та тривалому (або повторно-короткочасному) режиму роботи;

3) з врахуванням параметрів вибраного двигуна (зокрема, значення його моменту інерції ротору) обчислюється приведенне до валу двигуна значення J моменту інерції приводу;

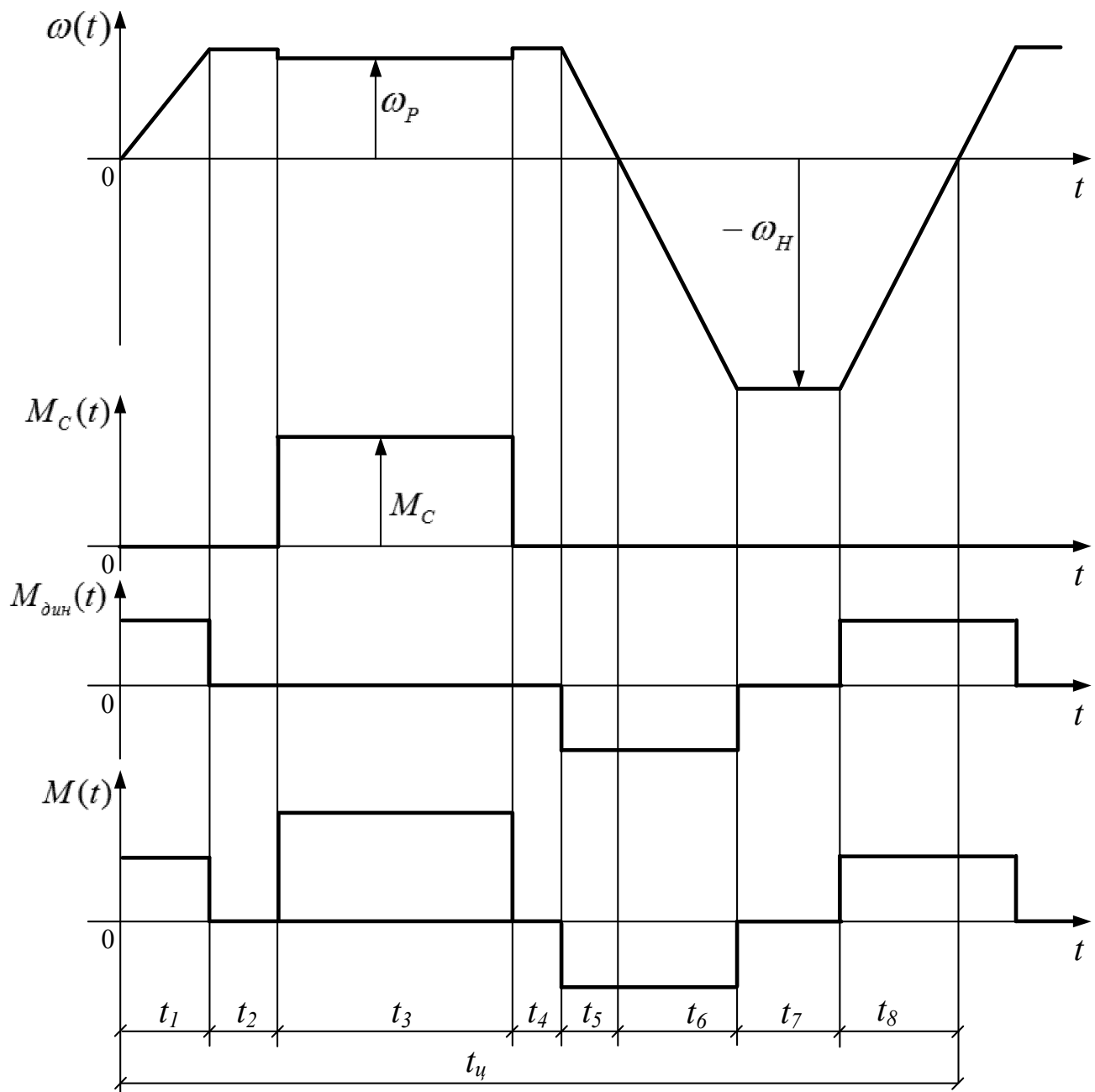


Рис.4.4 Часові діаграми швидкості $\omega(t)$ статичного моменту $M_c(t)$, динамічного моменту $M_{dyn}(t)$ та електромагнітного моменту $M(t)$ двигуна для регульованого за швидкістю електропривода

4) з аналітичних залежностей (1.11) та (4.81) обчислюються на інтервалі циклу t_u привода поточні значення динамічного моменту $M_{dyn}(t)$ та електромагнітного моменту $M(t)$ двигуна, графіки яких потім будуються на рис.4.4;

5) перевірка двигуна за нагрівом виконується за методом середніх змінних втрат потужності з залежності:

$$\Delta P_{\text{змін.сеп}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} [\sum \Delta P_{\text{змін.і}} \cdot \Delta t_i + \sum \Delta W_{\text{змін}}] \leq \beta_o \Delta P_{\text{змін.Н}}, \quad (4.103)$$

де $\sum \Delta P_{\text{змін.і}} \cdot \Delta t_i$ – сумарні змінні втрати енергії у всіх сталих режимах, що присутні у циклі повторення $t_{\text{ц}}$;

б) здійснюється перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю за моментом з залежності:

$$|M_{\text{max}}| < \lambda_M M_H - \quad (4.104)$$

для тиристорного електропривода постійного струму або

$$|M_{\text{max}}| < 0,8 \lambda_M M_H - \quad (4.105)$$

для частотно-регульованого асинхронного електропривода,

де $|M_{\text{max}}|$ – максимальне (за абсолютною величиною) поточне значення електромагнітного моменту $M(t)$ двигуна на рис.4.4;

λ_M – кратність пускового моменту для застосованого двигуна;

$\Delta P_{\text{змін.і}}$ та Δt_i – відповідно змінні втрати потужності в сталому режимі на i -му інтервалі часу тривлiстю Δt_i ;

$\sum \Delta W_{\text{змін}}$ – сумарні змінні втрати енергії двигуна у всіх динамічних режимах (розгону і гальмування) протягом циклу повторення $t_{\text{ц}}$;

$\Delta P_{\text{змін.Н}}$ – номінальне значення змінних втрат потужності двигуна, що розраховується з (4.15) або (4.17);

β_o – коефіцієнт погіршення тепловіддачі зупиненого двигуна, значення якого приведені в табл.4.2.

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнта тепловіддачі зупинених електродвигунів

№	Значення коефіцієнта β_o	Конструктивне виконання двигуна
1	1	з незалежною вентиляцією
2	0,95 – 0,98	закриті з примусовою вентиляцією
3	0,45 – 0,55	закриті самовентильовані
4	0,25 – 0,35	захищені самовентильовані

Якщо двигун не проходить перевірки за перевантажувальною здатністю за моментом або за нагрівом, необхідно взяти інший двигун найближчої більшої потужності і повторити для нього обчислення за п.п.3) – 6) запропонованої методики.

4.2.4 Визначення припустимого числа включень асинхронних короткозамкнених двигунів

Нагадаємо, що короткозамкнений АД є в теперішній час найбільш масово виробляємим і застосовуваним в експлуатації електродвигуном у світі (завдяки його простоті конструкції, експлуатаційній надійності і дешевізни у порівнянні з іншими типами двигунів).

При значній частоті включення короткозамкненого АД, що пускається прямим пуском, в цьому двигуні виникають значні втрати енергії в динамічних режимах, які визивають його інтенсивний нагрів. Саме за цією причиною обмежують частоту пусків, реверсів і гальмувань зазначеного двигуна.

Припустимим числом включень в час для короткозамкненого АД вважається таке, при якому середнє перевищення температури двигуна через його нагрів (при великій кількості циклів) дорівнює максимально припустимому.

Розглянемо найпростіший робочий цикл короткозамкненого АД, який складається з інтервалів пуску t_{Π} , сталого режиму роботи t_C , гальмування t_{Γ} і паузи t_O (причому протягом паузи всі статорні обмотки АД відключені від мережі). Такому циклу роботи (з часом $t_{\text{ц}}$ циклу) відповідає графік, що наведений на рис. 4.5.

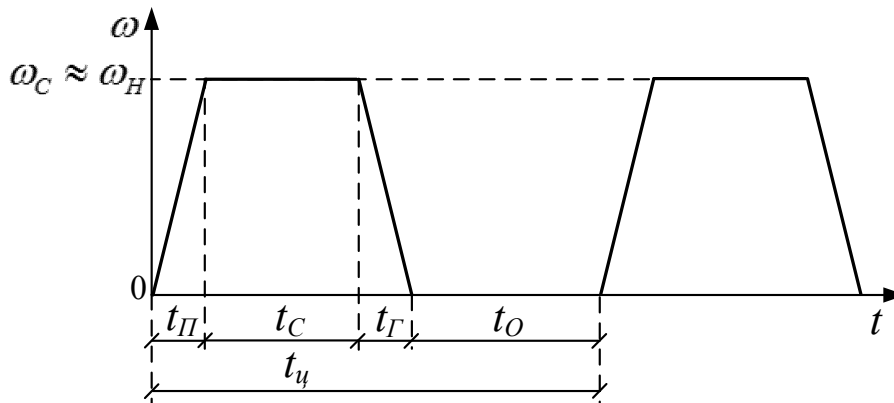


Рис.4.5 Повторно-короткочасний режим роботи короткозамкненого АД

Сумарні змінні втрати енергії $\Delta W_{\text{змін.ц}}$, які виділяються в короткозамкненому АД за час $t_{\text{ц}}$ циклу повторення, складаються з змінних втрат енергії при пуску $\Delta W_{\text{змін.П}}$, в сталому режимі роботи $\Delta W_{\text{змін.С}}$ і при гальмуванні $\Delta W_{\text{змін.Г}}$ та розраховуються у вигляді:

$$\Delta W_{\text{змін.ц}} = \Delta W_{\text{змін.П}} + \Delta W_{\text{змін.С}} + \Delta W_{\text{змін.Г}}. \quad (4.106)$$

При цьому згадані змінні втрати енергії в короткозамкненому АД при пуску $\Delta W_{\text{змін.П}}$, гальмуванні $\Delta W_{\text{змін.Г}}$ і реверсі $\Delta W_{\text{змін.рев}}$ можуть бути розраховані: під навантаженням – з (4.73), а без навантаження – з співвідношень (4.65), (4.67), (4.68) і (4.69).

Змінні втрати енергії в сталому режимі цього двигуна визначаються з залежності:

$$\Delta W_{\text{змін.С}} = \Delta P_{\text{змін}} \cdot t_{\text{С}}, \quad (4.107)$$

де $\Delta P_{\text{змін}}$ – змінні втрати потужності короткозамкненого АД в сталому режимі, які можуть бути знайдені з (4.16) з врахуванням (4.28).

З умови неперевищення середнім значенням змінних втрат потужності $\Delta P_{\text{змін.сер}}$ двигуна максимально припустимого для них значення, що дорівнює $\beta_0 \Delta P_{\text{змін.Н}}$:

$$\Delta P_{\text{змін.сер}} = \Delta W_{\text{змін.ц}} / t_{\text{ц}} \leq \beta_0 \Delta P_{\text{змін.Н}}, \quad (4.108)$$

здійснюється визначення припустимого за нагрівом числа включень короткозамкненого АД на годину. Зазначена кількість h включень на годину короткозамкненого АД може бути отримана шляхом перетворення співвідношення (4.108) на розрахункову залежність наступного вигляду:

$$h \approx 3600 \frac{(\Delta P_{\text{змін.Н}} - \Delta P_{\text{змін}})(\text{ПВ}) + \beta_0 \Delta P_{\text{змін.Н}}(1 - \text{ПВ})}{\Delta W_{\text{змін.П}} + \Delta W_{\text{змін.Г}}}, \quad (4.109)$$

де $\Delta P_{\text{змін}}$ та $\Delta P_{\text{змін.Н}}$ – відповідно фактичне і номінальне значення змінних втрат потужності АД в сталому режимі роботи;

β_0 – коефіцієнт тепловіддачі двигуна, що застосовується (який визначається з табл.4.2);

ПВ – фактичне значення тривалості включення двигуна, що обчислюється з співвідношення:

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{Р}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% = \frac{t_{\text{П}} + t_{\text{С}} + t_{\text{Г}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{С}} + t_{\text{Г}} + t_{\text{О}}} \cdot 100\%. \quad (4.110)$$

У випадку роботи короткозамкненого АД в сталому режимі з номінальним навантаженням (коли $\Delta P_{\text{змін}} = \Delta P_{\text{змін.Н}}$) формулу (4.109) можна спростити до наступного вигляду:

$$h \approx 3600 \frac{\Delta P_{\text{змін.Н}} \beta_0 (1 - \text{ПВ})}{\Delta W_{\text{змін.П}} + \Delta W_{\text{змін.Г}}}. \quad (4.111)$$

Звернемо увагу на те, що, по-перше, залежностями (4.109) і (4.111) можна користуватися також при наявності режиму реверсу в діаграмі роботи короткозамкненого АД, тільки при цьому слід додатково включити в складові $\Delta W_{\text{змін.П}}$ та $\Delta W_{\text{змін.Г}}$ також втрати енергії двигуна при пуску і гальмуванні, що відповідають режиму реверса і розраховуються з (4.73).

По-друге, розглянуті вище аналітичні залежності (4.109) і (4.111) для визначення припустимого числа включень короткозамкненого АД широко на практиці використовуються у якості простої і ефективної методики перевірки за нагрівом зазначеного двигуна, що працює в повторно-короткочасному режимі.

По-третє, якщо час роботи $t_{\text{Р}}$ двигуна перевищує 10хв, то розглянуту методику визначення припустимого числа включень короткозамкненого АД використовувати не можна, а замість цього потрібно виконувати перевірку на

нагрів цього двигуна аналогічно раніше розглянутій методиці для його роботи з тривалим постійним навантаженням.

Контрольні питання

1. Вибір електродвигуна за конструктивним виконанням (виходячи з умов захисту від впливу навколишнього середовища і виду вентиляції).
2. Розрахунок потужності і перевірка на нагрів нерегульованого за швидкістю електродвигуна, що працює з постійним тривалим навантаженням.
3. Розрахунок потужності і перевірка на нагрів нерегульованого за швидкістю електродвигуна, що працює з змінним тривалим навантаженням.
4. Розрахунок потужності і перевірка на нагрів нерегульованого за швидкістю електродвигуна, що працює в повторно-короткочасному режимі.
5. Перевірка двигуна за максимальною і пусковою перевантажувальною здатністю за моментом.
6. Розрахунок потужності і перевірка на нагрів регульованого за швидкістю електродвигуна.
7. Суть, аналітичний вид і галузь застосування існуючих методів перевірки двигунів на нагрів (за середніми втратами потужності, еквівалентним моменту і струму).
8. Визначення припустимого числа включень асинхронного короткозамкненого двигуна

ДЖЕРЕЛА ВИКОРИСТАННОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – Л. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 722 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
3. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224с.
4. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учебное пособие. – М.: Издательский центр “Академия”, 2004. – 256 с.
5. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1966. – 297 с.
6. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
7. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Высш. шк., 1979. – 318 с.
8. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С.Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. В.М. Перельмута. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
9. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
10. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электроприводом: Учебник. – М.: ИНФРА – М, 2004. – 208 с.
11. Основы автоматизированного электропривода: Учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
12. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
13. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 184 с.
14. Слежановский О.В. Реверсивный электропривод постоянного тока. – М.: Металлургия, 1967. – 422 с.
15. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

Методичне видання

О. В. Волков
д.т.н, професор
І. О. Косенко
к.т.н.

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

Навчально-методичний посібник
для студентів ЗДІА
напряму 6.050602 та спеціальності "Гідроенергетика"
денної та заочної форм навчання

Підписано до друку 15.09.2016р. Формат 60х84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 9,7. Наклад 1 прим.
Внутрішній договір № 126/16

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Соборний, 226
ЗДІА